

**Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke**

**Couplage du logiciel de modélisation de l'habitat MaxEnt à des simulations  
du couvert nival pour l'amélioration de la prédiction de présence du caribou de Peary**

**Chloé Martineau**

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
Maître ès sciences géographiques (M.Sc.), Cheminement Géomatique**

**Avril 2020**

**© Chloé Martineau, 2020**



## **Composition du jury**

Directeur de maîtrise : Prof. Alexandre Langlois

Codirectrice de maîtrise : Dr. Cheryl Ann Johnson, Environnement et Changements Climatiques  
Canada

Codirectrice de maîtrise : Dr. Isabelle Gouttevin, Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse,  
Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, Grenoble, France

## Résumé

Les changements climatiques en Arctique sont actuellement les plus rapides à l'échelle planétaire. Le réchauffement de l'air induit des variations importantes à plusieurs niveaux, comme des événements de pluie-sur-neige (PSN) de plus en plus fréquents en Arctique. Les PSN ont des impacts très variés, notamment au niveau de la faune, avec la création de croutes de glace suivant le retour des températures froides après l'épisode de PSN. La végétation, enclavée sous la couche de glace au sol, devient difficile d'accès, voire inaccessible pour les herbivores souvent pour de longues périodes et sur de grands territoires pouvant entraîner des épisodes de mort massive. Beaucoup de ces épisodes sont documentés, notamment chez le caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*) dans l'Archipel Arctique Canadien. Les contraintes d'accessibilité aux ressources alimentaires ont le potentiel de limiter leur croissance et leur survie, dans un contexte où les phénomènes de PSN, tout comme les couches de neige à haute densité, peuvent en restreindre grandement l'accessibilité. Plusieurs études ont créé des modèles de prédiction de l'habitat du caribou, mais jamais en intégrant une modélisation spatiale de la neige. L'objectif de cette étude est de développer et valider un Système d'Informations Géographiques (SIG) de modélisation à haute résolution spatiale des propriétés nivales affectant l'accès à la nourriture pour le caribou de Peary en utilisant le logiciel MaxEnt. Les résultats présentés dans ce mémoire montrent principalement que la neige, spécifiquement l'épaisseur et la densité de celles-ci, sont des variables qui influencent le choix d'habitat du caribou de Peary dans chacune des saisons biologiques. Les modèles développés montrent que la modélisation de la neige par le modèle SNOWPACK est un outil utile à l'étude de l'écologie du caribou de Peary.

**Mots-clés :** Arctique, changements climatiques, MaxEnt, Caribou de Peary, pluie-sur-neige, densité du couvert nival, modèle SNOWPACK, modélisation de la distribution des espèces.

## Table des matières

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problématique .....	1
1.2 Objectifs .....	4
1.3 Hypothèses .....	5
<b>2. Cadre théorique.....</b>	<b>5</b>
2.1 Biologie du Caribou de Peary .....	5
2.2 Le modèle SNOWPACK .....	8
2.3 Outil de Spatialisation de SNOWPACK en Arctique.....	9
2.4 Création de modèles de prédiction de l’habitat avec le logiciel MaxEnt.....	10
2.4.1 Les modèles de prédiction de l’habitat.....	10
2.4.2 Le logiciel MaxEnt.....	11
2.4.3 Données et modélisation .....	12
<b>3. Méthode.....</b>	<b>14</b>
3.1 Objectif 1 : Raffinement de la résolution de l’OSSA .....	15
3.2 Objectif 2 : Amélioration de la qualité de la modélisation de la neige.....	15
3.3 Objectifs 3 et 4 : SIG et modélisation de l’habitat.....	16
<b>4. Article .....</b>	<b>17</b>
Abstract.....	19
Résumé .....	21
1. Introduction .....	23
2. Background: a context for Peary caribou .....	25
3. Data and methods .....	29
3.1. Study site.....	29
3.2 Telemetry data .....	31
3.3 SNOWPACK snow model and its application over BIC region .....	32
3.4 Environmental predictor variables .....	35
3.4.1 <i>Vegetation</i> .....	35
3.4.2 <i>Disturbance</i> .....	36
3.5 Configuration of the MaxEnt model for the characterization of Peary caribou habitats over BIC.....	36
4. Results .....	38
4.1 Characterization of snowpack conditions on BIC using the SNOWPACK model .....	38
4.1.1 <i>Evaluation of SNOWPACK simulations in Arctic context</i> .....	38

4.1.2 <i>Evaluation of SNOWPACK downscaling to 1 km over BIC</i> .....	40
4.2 Caribou habitats over the 3 biological seasons .....	42
4.2.1. <i>MaxEnt models and explanatory variables</i> .....	42
4.2.2. <i>Habitat models results analysis</i> .....	44
5. Discussion.....	47
6. Conclusions .....	52
Acknowledgements .....	53
References .....	54
Supplementary material .....	65
<b>5. Conclusion</b> .....	<b>66</b>
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>70</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombres de points télémétriques GPS disponibles dans le Complexe d'Îles de Bathurst selon les trois saisons biologiques du Caribou de Peary .....	13
<b>Article</b> – Table 1. Number of available telemetry GPS points on the Bathurst Island Complex for each Peary caribou biological season from July 2003 to June 2004 .....	31
<b>Article</b> – Table 2. Summary of data used in MaxEnt habitat models and major references justifying inclusion in this study .....	35
<b>Article</b> – Table 3. Descriptive statistics of the modelled snow for each biological season using the Antarctic version .....	42
<b>Article</b> – Table 4. Results of the forwards statistical procedure which allowed to choose the final model for each of the biological seasons. ....	43
<b>Article</b> – Table 5. Description of the selected models for each Peary caribou biological season. ....	44
<b>Article</b> – Table 6. Correlation coefficients between variables used in MaxEnt modeling .....	65
Tableau 2 : Table de contingence entre la couverture du sol réelle sous les snowpits de l'année 2015 et les pixels associés .....	78

## Liste des figures

Figure 1 : Caribou de Peary (Figure tirée de Johnson et al., 2016).....	1
Figure 2 : Distribution du caribou de Peary définie en utilisant une méthodologie de polygone convexe standard utilisant des données provenant de survols, de télémétrie et de savoir traditionnel autochtone (1970-2015). (Figure tirée de Johnson et al., 2016, traduction libre) .....	6
Figure 3 : Principaux facteurs induits par les changements climatiques amenant une diminution de la croissance des populations et le taux de survie du caribou de Peary (Inspiré de Johnson et al., 2016).....	8
Figure 4 : Organigramme méthodologique .....	14
<b>Article</b> – Figure 1. Peary caribou distribution defined using a standard convex polygon methodology using aerial counts, telemetry and traditional knowledge (1970-2015) (figure from Johnson et al., 2016).....	26
<b>Article</b> – Figure 2. Peary caribou (photo courtesy of Dr. Micheline Manseau ©) .....	27

<b>Article</b> – Figure 3. Geographical distribution of the Peary caribou telemetry GPS points from July 2003 to June 2004 on the Bathurst Island Complex.....	30
<b>Article</b> – Figure 4. Comparison of the density profiles (colors) with Antarctic SNOWPACK version (top simulation) and standard version (bottom simulation) at Cambridge Bay site.....	38
<b>Article</b> – Figure 5. Simulations of top and bottom snow layers density with the original SNOWPACK version (red triangles) and using the Antarctic version (blue triangles).....	40
<b>Article</b> – Figure 6. Spatial variability of CT350 for the April to June biological season on Bathurst Island Complex (Nunavut, Canada) induced by topography at 1 km scale.....	41
<b>Article</b> – Figure 7. Graphical representation of the habitat model for every Peary caribou biological seasons.....	45
Figure 5 : Épaisseur cumulée de neige lorsque la densité dépasse 350 kg m <sup>-3</sup> sur le site du bassin versant de Greiner en 2016.....	73
Figure 6 : Vitesse du vent à la station météorologique de Cambridge Bay du 16 octobre 2014 au 30 juin 2015. La ligne droite est la vitesse moyenne annuelle : 4,674 m·s <sup>-1</sup> .....	75
Figure 7 : Vitesse du vent à la station météorologique de Cambridge Bay du 1 juillet 2015 au 30 juin 2016. La ligne droite est la vitesse moyenne annuelle : 4,285 m·s <sup>-1</sup> .....	75
Figure 8 : Couverture du sol dans la zone d'étude à l'ouest du bassin versant de Greiner, île de Victoria, Nunavut .....	76
Figure 9 : Densité des couches inférieure (BOT) et supérieure (TOP) des snowpits selon l'absence ou la présence de végétation en 2016.....	79
Figure 10 : Épaisseur de la neige des snowpits de 2016 en fonction du type de végétation (codes numériques au tableau 2).....	80
Figure 11 : Équivalent en eau de la neige (SWE) des snowpits de 2016 en fonction du type de végétation (codes numériques au tableau 2) .....	80

### Liste des annexes

Annexe 1 – Résultats complémentaires .....	73
Annexe 2 – Liste des présentations et affiches .....	81



### Liste des abréviations

AAC	Archipel Arctique Canadien
CIB	Complexe d'Îles de Bathurst
CIRCA2000	Données d'occupation du sol circa2000-vectorielle, ou CSC2000-V
COSEPAC	Comité sur la Situation des Espèces en Péril au Canada
DNEC	Données Numériques d'Élévation du Canada
ECCC	Environnement et Changements Climatiques Canada
GEM-LAM	Global Environmental Multiscale Limited-Area Model
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GLM	Modèle Linéaire Généralisé
GRIMP	Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRIS	InfraRed Integrating Sphere
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
LEP	Loi sur les Espèces en Péril
MRCC	Modèle Régional Canadien du Climat
NARR	North American Regional Reanalysis
NCEP	National Center for Environmental Prediction
PSN	Pluie-Sur-Neige
OSSA	Outil de Spatialisation de SNOWPACK en Arctique
STA	Savoir Traditionnel Autochtone
SIG	Système d'Informations Géographiques
SWE	Équivalent en Eau de la Neige
VAS	Version Antarctique de SNOWPACK
VOS	Version Originale de SNOWPACK

## Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de maîtrise, Alexandre Langlois. Merci énormément pour ton temps, ta confiance et toute la latitude que tu m'as donnée dans ces années de maîtrise. Merci pour les nombreuses opportunités que tu m'as offertes; Cambridge Bay, Ottawa, Grenoble, et j'en passe.

J'aimerais également remercier mes deux codirectrices de maîtrise. Tout d'abord, Dr. Cheryl Ann Johnson, merci pour les précieux conseils et pour m'avoir accueillie au Service Canadien de la Faune. Ensuite, Dr. Isabelle Gouttevin, merci énormément de m'avoir accueillie pendant deux mois dans la magnifique Grenoble à l'IRSTEA. J'ai énormément appris dans nos rencontres et j'en suis très reconnaissante.

Merci également au jury pour l'évaluation finale de ce travail.

J'aimerais souligner l'aide de la superbe équipe du laboratoire d'Alex. Jean-Benoît, Alex M., Caroline, Guillaume, Vincent, Julien, Simon et Daniel, merci pour votre énergie et votre aide. Ça été un merveilleux deux ans passés en votre compagnie, sur le terrain comme au bureau!

Finalement, j'aimerais remercier mon conjoint Colin qui m'a soutenue et encouragée au travers de cette épopée. J'ai hâte à la suite!



## 1. Introduction

### 1.1 Problématique

Les populations de caribou sont actuellement en déclin partout autour du globe (Vors et Boyce, 2009). Au Canada, les 12 unités désignables de caribou sont actuellement considérées comme ayant un statut préoccupant, menacé ou en voie de disparition par la *Loi sur les espèces en péril* du gouvernement fédéral du Canada (LEP) (L.C. 2002, ch.29). Plus spécifiquement, le Caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*) (Figure 1), l'unité désignable dont la distribution est la plus nordique, a été nommé comme menacé en 1979 et en 2015 par le Comité sur la Situation des Espèces en Péril au Canada (COSEPAC), et a été décrété officiellement en voie de disparition par la LEP en 2010. En effet, le nombre d'individus de cette sous-espèce a passé de 40 000 individus en 1960 à moins de 8 000 individus en 2015, une réduction d'environ 80% de la population (Johnson *et al.*, 2016). De nombreuses études ont tenté d'expliquer le déclin de la taille des populations de caribou de Peary. Les causes possibles de ce déclin comportent la chasse traditionnelle par les Inuits (Boulanger *et al.*, 2011; Festa-Bianchet *et al.*, 2011; Gunn *et al.*, 2006), la réduction du taux de survie chez les femelles et les jeunes (Boulanger *et al.*, 2011), la prédation par les loups induite par le nombre élevé de boeufs musqués (Festa-Bianchet *et al.*, 2011), et bien sûr, les changements climatiques (Festa-Bianchet *et al.*, 2011; Gunn, 2003; Sharma *et al.*, 2009), en particulier l'augmentation de l'occurrence des événements de pluie-sur-neige (PSN) (Gunn *et al.*, 2006; Miller et Gunn, 2003; Stien *et al.*, 2010; Langlois *et al.*, 2017).



**Figure 1 : Caribou de Peary (Figure tirée de Johnson *et al.*, 2016).**

Les changements climatiques en Arctique sont actuellement les plus rapides à l'échelle planétaire. Le réchauffement observé est environ deux fois plus rapide que le reste de la planète (IPCC, 2014; Meredith *et al.*, 2019). De plus, selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, ou IPCC en anglais, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) (Meredith *et al.*, 2019), les hivers de 2016 et 2018 avaient une température de l'air moyenne de plus de 6°C au-delà de la moyenne des années 1981 à 2010. Ce réchauffement hivernal a pour effet d'augmenter la fréquence d'événements de redoux hivernaux et de pluie-sur-neige, notamment en Arctique (Dolant *et al.*, 2017; Liston et Hiemstra, 2011; Semmens *et al.*, 2013; Langlois *et al.*, 2017). En effet, la proportion de précipitations liquides a augmenté significativement entre 1950 et 2009 dans cette région (Mekis et Vincent, 2011). Liston et Hiemstra (2011) ont modélisé les tendances moyennes des événements de PSN sur 30 ans (1979 à 2009) et ont démontré que le nombre de jours de PSN augmente de 0,03 jour par décennie et que le nombre de jours d'enneigement diminue de 2,49 jours par décennie. Langlois *et al.* (2017) ont également montré que les événements de PSN ont triplé en comparant la période de 1979–1994 à celle de 1995–2011. Ces changements climatiques ont de nombreux effets sur les différents systèmes physiques et écologiques des environnements nordiques. En Arctique, le réchauffement de l'air a un impact négatif sur le couvert nival (Derksen et Brown, 2012), avec un impact potentiellement important sur l'hydrologie (i.e. distribution spatiale de l'équivalent en eau de la neige), le climat (i.e. rétroaction de l'albédo) et l'écologie de la région (i.e. accès à la nourriture de certaines espèces) (UNEP, 2007).

Considérant que :

- la neige est un constituant primaire de l'écologie du caribou (COSEPAC, 2004);
- les changements climatiques tendent à rendre les conditions de forage de plus en plus difficiles pour cette espèce en péril en créant des couches de neige très denses (Ouellet *et al.*, 2016; Vikhamar-Schuler *et al.*, 2013), et;
- les modèles de prédictions de l'habitat du caribou actuels qui n'incluent pas les conditions nivales ne permettent pas de prédire précisément l'état des populations dans le futur (Johnson *et al.*, 2016);

nous pouvons estimer que l'étude et la caractérisation du couvert nival est maintenant un aspect primordial de la conservation du caribou de Peary. Cependant, le suivi des conditions neigeuses

est extrêmement difficile en Arctique pour deux raisons principales. Tout d'abord, le nombre de stations météorologiques dans cette région est extrêmement limité (Grenfell et Putkonen, 2008; Kaufman *et al.*, 2009). Il est impossible d'avoir des observations valables à une échelle fine pour tout le territoire avec le nombre actuel de stations météorologiques. Ensuite, la quantité de données sur le couvert nival *in situ* est également très limitée voire inexistant sur la majorité du territoire de l'Archipel Arctique Canadien (ACC), notamment dû au coût élevé des expéditions dans la région et des contraintes logistiques d'accès (Langlois *et al.*, 2012). Or, comme le caribou de Peary utilise pour territoire l'ensemble de l'ACC (~1,9M km<sup>2</sup>), il est important d'avoir une vision d'ensemble des conditions neigeuses, motivant l'approche par modélisation se basant sur des observations satellitaires. L'équipe du Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires (GRIMP) de l'Université de Sherbrooke a donc créé l'Outil de Spatialisation de SNOWPACK en Arctique (OSSA), qui permet de simuler et spatialiser les conditions de neige dans l'Arctique avec le modèle SNOWPACK (Ouellet *et al.*, 2017). Le modèle physique SNOWPACK, utilisé par l'OSSA pour la modélisation de la structure du couvert nival, a été développé pour la prédiction d'avalanches en environnement alpin, dans les alpes suisses (Bartelt et Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002a; Lehning *et al.*, 2002b) et donc une meilleure paramétrisation de ce modèle devient nécessaire pour une application en milieu arctique.

Pour bien comprendre une espèce animale, il faut considérer l'ensemble des variables biotiques et abiotiques qui influencent l'espèce directement et indirectement. Pour le caribou de Peary, nous pouvons considérer par exemple la végétation, le type de sol, la prédation, la dynamique de la population, et plusieurs autres variables environnementales et biologiques (COSEPAC, 2004). À ce sujet, une équipe de chercheurs à Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC) étudie le caribou de Peary depuis plus de 50 ans (Johnson *et al.*, 2016). Ils possèdent une excellente connaissance de la dynamique des populations de caribou de Peary et de l'état actuel de l'espèce. Cette équipe a récemment créé des modèles de prédiction de l'habitat du caribou de Peary couplant des données de comptes de caribous et des variables environnementales (Johnson *et al.*, 2016) par l'utilisation du logiciel MaxEnt (*Maximum Entropy*). MaxEnt est un logiciel de modélisation de l'habitat spécialisé pour les bases de données de type présence-seulement, c'est-à-dire qui ne contiennent pas de données d'absence (Elith *et al.*, 2006). Il nécessite des données géoréférencées d'occurrence d'une espèce sur un territoire donné et un ensemble de variables

environnementales (Elith *et al.*, 2011). À partir de ces informations, il modélise l'aire de distribution de l'espèce. La modélisation obtenue est une distribution de la probabilité de l'occurrence d'un individu de l'espèce dans chaque cellule du territoire (Phillips et Dudik, 2008). Leurs modèles n'incluaient cependant pas la neige. La performance de leurs modèles était acceptable, mais à la lumière des recherches de Ouellet *et al.* (2017), nous croyons que l'ajout de modélisation de la neige pourrait améliorer la qualité des modélisations, et ce, à l'année longue.

## 1.2 Objectifs

L'objectif principal du projet est donc de développer et valider un Système d'Informations Géographiques (SIG) de modélisation à haute résolution spatiale des propriétés nivales affectant l'accès à la nourriture pour le caribou de Peary au Canada, adaptable à divers critères climatiques, de l'environnement, et de neige. Les objectifs spécifiques du projet visent à :

1. Automatiser l'Outil de Spatialisation de SNOWPACK en Arctique pour permettre une simulation des conditions neigeuses à un 1 km<sup>2</sup> de résolution (1 km x 1 km, contre l'actuelle résolution de 32 x 32 km). Cette échelle spatiale est beaucoup plus adaptée à l'étude de l'écologie d'une espèce animale vivant en Arctique, et permet d'obtenir une précision accrue pour la modélisation de la neige, limitant la perte d'informations obtenue sur une modélisation de pixels de 1024 km<sup>2</sup> (32 x 32 km)
2. Améliorer et valider les simulations de neige issues du modèle SNOWPACK avec les données récoltées sur le terrain à Cambridge Bay (Nunavut) et la version empirique 'Antarctique' de SNOWPACK. Ceci permettra d'obtenir des résultats plus adaptés à la région Arctique en termes de densité et épaisseur.
3. Intégrer des données géoréférencées du caribou de Peary en utilisant le logiciel de modélisation de distribution des espèces MaxEnt pour développer des modèles de prédiction de l'habitat du caribou pour chaque période de l'année importante dans la biologie du caribou. Ce logiciel spécialisé permet de lier des données de présence d'une espèce à des variables environnementales (incluant les variables issues de la modélisation par l'OSSA) afin de déterminer la qualité de l'habitat à l'échelle du pixel. Il est tout à fait adapté à cette étude et permettra de déterminer statistiquement l'importance de chaque variable environnementale, dont la neige, pour la présence du caribou.

### 1.3 Hypothèses

L'hypothèse de recherche principale est que l'inclusion de simulations de neige, en particulier la densité, adaptées pour la région arctique dans le modèle MaxEnt, permettra d'améliorer la prédiction de présence du caribou de Peary. En utilisant un forçage météorologique issu de données de réanalyses et d'information sur les propriétés du sol (type de sol et topographie), il sera possible de spatialiser ces simulations de neige qui sont réalisées en mode « colonne ».

## 2. Cadre théorique

### 2.1 Biologie du Caribou de Peary

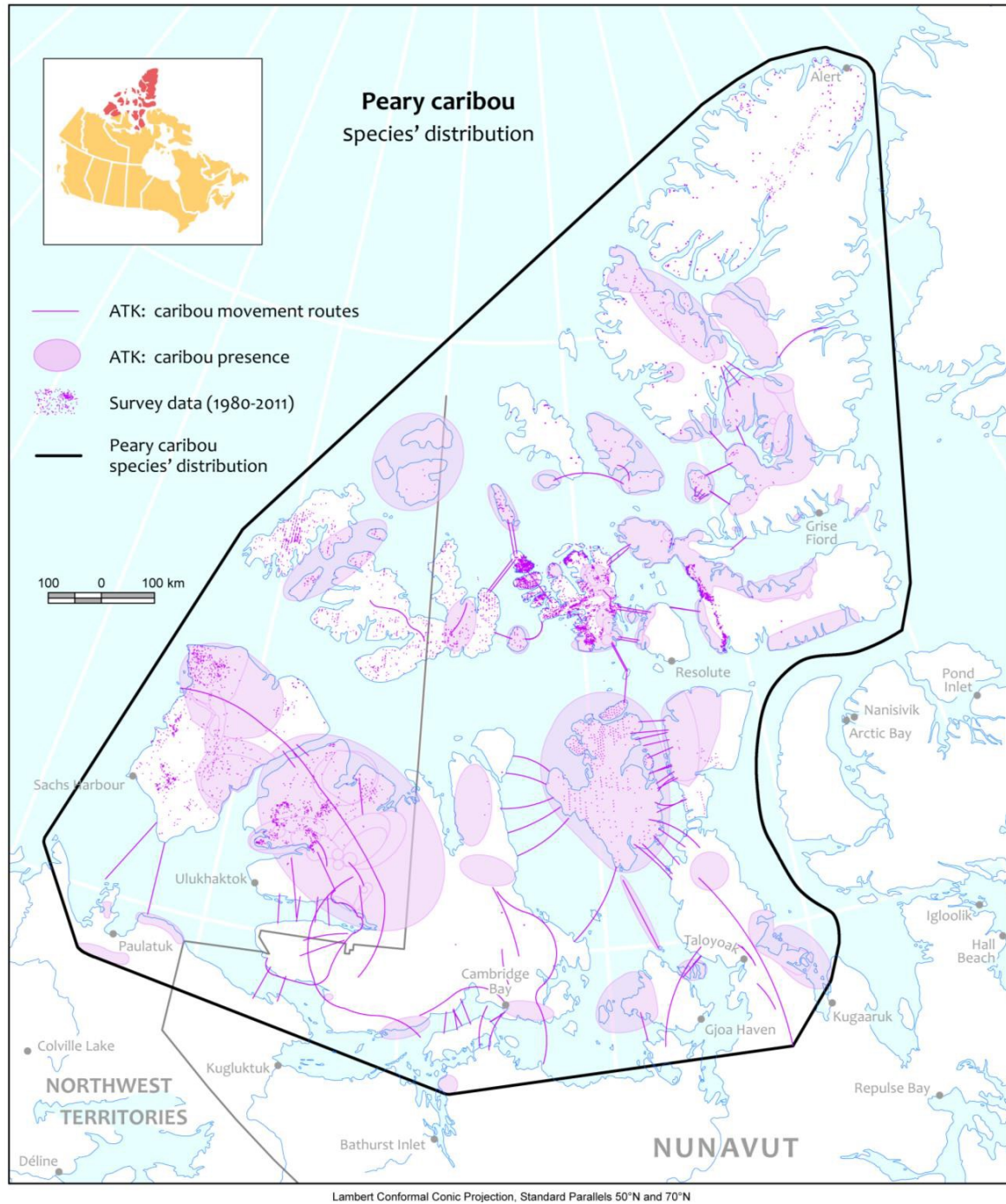
Le Caribou de Peary est une des douze unités désignables de l'espèce caribou (*Rangifer tarandus*) au Canada. Il s'agit d'une unité désignable endémique à l'AAC, soit dans le territoire du Nunavut. Le territoire du Caribou de Peary a une superficie supérieure à 1 900 000 km<sup>2</sup> (COSEPAC, 2015). On dénombre quatre populations distinctes de Caribou de Peary, soit les populations des îles Reine-Élisabeth, des îles de Banks et Victoria, des îles de Prince-de-Galles et Somerset, ainsi que de la péninsule de Booth (Figure 2) (Johnson *et al.*, 2016).

Le Caribou de Peary vit environ 13 à 15 ans. Il atteint l'âge de reproduction à 3 ans pour la femelle et 4 ans pour le mâle (COSEPAC, 2004). Le Caribou de Peary est le plus petit des caribous du Canada, et montre plusieurs adaptations à la région du Haut-Arctique. En effet, il montre un pelage plus dense, un museau plus court, ainsi que des sabots plus courts et larges que les autres unités désignables de caribou au Canada (Figure1) (COSEPAC, 2004). De plus, il montre des préférences alimentaires différentes des autres unités désignables, notamment en choisissant davantage de mousses que de lichens et en privilégiant les fleurs l'été puisque celles-ci sont riches en protéines et en énergie (COSEPAC, 2004).

L'habitat du Caribou de Peary est uniquement décrit par la toundra arctique. Le dénivelé général de son habitat est variable, allant de terrains plats dans le sud-ouest (ex. Île de Victoria) à des régions très montagneuses au nord-est (ex. Île d'Ellesmere). L'alimentation du Caribou de Peary consiste exclusivement de végétaux. Il se nourrit principalement de mousses et lichens, et



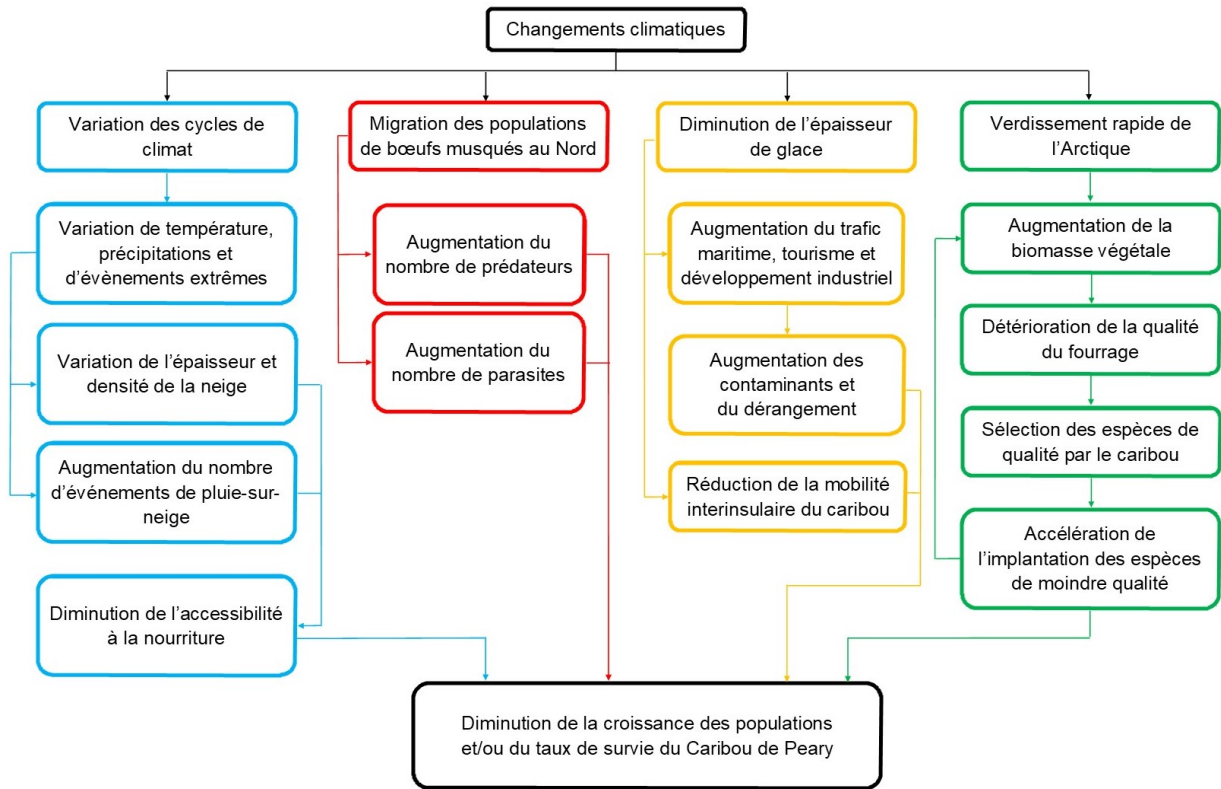
complète son alimentation estivale avec des herbacées et graminées, notamment de la famille *Salix sp.* (Johnson *et al.*, 2016).



**Figure 2 : Distribution du caribou de Peary définie en utilisant une méthodologie de polygone convexe standard utilisant des données provenant de survols, de télémétrie et de savoir traditionnel autochtone (1970-2015).**  
(Figure tirée de Johnson *et al.*, 2016, traduction libre).

Le cycle annuel du Caribou de Peary peut être résumé en trois périodes critiques. La première période, le printemps, va d'avril à juin. Les caribous migrent et les femelles procèdent à la mise bas. Lors de la deuxième période, l'été, soit de juillet à octobre, les individus créent leurs réserves de graisse pour l'hiver et entrent en période de rut, soit la période de reproduction chez les ongulés. Finalement, pendant l'hiver de novembre à mars, les caribous sont en alimentation hivernale, également appelée période de survie, jusqu'au printemps (COSEPAC, 2004). L'hiver est donc le moment le plus critique du cycle annuel du caribou de Peary. Ces dates demeurent cependant approximatives et dépendent principalement des conditions variant au long des gradients environnementaux.

La disponibilité des végétaux n'est pas limitante pour le caribou de Peary en raison de son très grand territoire, mais l'accessibilité aux ressources alimentaires a le potentiel de limiter leur croissance et leur survie. Par exemple, les événements de pluie-sur-neige et les plaques de vent (*wind slabs*) peuvent la restreindre grandement en durcissant le couvert nival. Ouellet *et al.* (2016) ont montré qu'une densité de la neige supérieure à  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  suffit pour nuire au caribou de Peary voulant accéder à la végétation. De plus, comme l'habitat du caribou de Peary se trouve dans l'AAC, il est constitué d'îles et donc les déplacements interinsulaires hivernaux sont fréquents par la glace de mer pour la recherche de végétation et sont ainsi critiques à sa survie (COSEPAC, 2004). Les changements climatiques, les passages plus fréquents d'embarcations dans les voies navigables de l'ACC et les développements miniers et pétroliers pourraient donc devenir très problématiques à ces mouvements de populations (Johnson *et al.*, 2016; Mallory et Boyce, 2017; Miller et Barry, 2009). Les plus importants facteurs induits par les changements climatiques influençant le taux de croissance et le taux de survie des caribous de Peary sont présentés à la figure 3.



**Figure 3 : Principaux facteurs induits par les changements climatiques amenant une diminution de la croissance des populations et le taux de survie du caribou de Peary.**  
 Inspiré de Johnson *et al.* 2016.

## 2.2 Le modèle SNOWPACK

Le modèle physique de neige SNOWPACK (Bartelt et Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002a; Lehning *et al.*, 2002b) a été choisi dans le cadre de ce projet notamment parce qu'il est déjà intégré à l'OSSA (Ouellet *et al.*, 2016) et qu'il permet une simulation des propriétés physiques de la neige comme la densité. Le choix de ce modèle est également justifié par sa structuration en différentes couches (modèle multi-couches) pouvant avoir des propriétés et évolutions différentes (Madore *et al.*, 2018). Des deux modèles actuels qui ont ce fonctionnement (CROCUS et SNOWPACK), le modèle SNOWPACK, étant déjà intégré à l'OSSA, faisant l'objet d'une expertise au GRIMP et ayant fait l'objet de modifications pour des environnements non-alpins, est plus adapté. Ce modèle a été développé par le SLF pour la prédiction d'avalanches en environnement alpin, dans les Alpes suisses, et le GRIMP a démontré que ce modèle peut être

utilisé dans l'Arctique, mais qu'il nécessite des améliorations pour être adapté à de telles conditions.

Parmi ces améliorations possibles, Groot Zwaatink *et al.* (2013) ont développé une version empirique du modèle SNOWPACK, qui est adaptée aux conditions de l'Antarctique, c'est-à-dire principalement à des conditions de vents et températures extrêmes. En Antarctique, la déposition de la neige n'est pas principalement régie par les précipitations, mais plutôt par des événements de neige soufflée (*drifting snow*), qui apportent de la neige d'autres territoires ou la redistribuent à petite échelle au sein du territoire d'intérêt. Ce phénomène a deux effets principaux : 1) cela mène à des changements d'épaisseur attendue du couvert nival en la redistribuant sur le territoire et 2) cela contribue significativement à la densification de la surface en érodant les grains et en diminuant leur taille. Comme la version originale du modèle SNOWPACK ne simule pas ce phénomène, elle ne permet pas de simuler la couche de neige dense en surface telle que mesurée sur le terrain. La nouvelle version du modèle SNOWPACK que proposent Groot Zwaatink *et al.* (2013), qui a été appelée « version Antarctique », permet de pallier ces problèmes. La version ajoute une nouvelle condition pour l'ajout de neige en surface : le modèle n'ajoute de la neige que lorsque la moyenne de la vitesse du vent à une hauteur de 3 mètres est supérieure à  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  sur 100 heures. La densité de la nouvelle couche de neige sera calculée avec l'équation suivante, où  $\rho_n$  est la densité de la nouvelle couche de neige ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

$$\rho_n = 361 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_{\text{event}}}{U_0} \right) + 250 \quad (1)$$

Cette équation permet d'augmenter la densité d'environ  $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  par tranche d'augmentation de la vitesse du vent de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les paramètres de microstructure de grains sont également modifiés dans la version Antarctique si la vitesse du vent est plus grande que  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ou si l'humidité relative sur une moyenne de 100 heures est modifiée de plus de 75%. C'est donc cette version qui sera évaluée dans le but d'être intégrée à l'OSSA, à 1 km de résolution et dont la validation avec des données terrain est présentée dans l'article (section 4).

### 2.3 Outil de Spatialisation de SNOWPACK en Arctique

Le fonctionnement de l'OSSA (Ouellet, 2016) actuel est très simple. L'utilisateur doit soumettre une zone sous format *shapefile* et indiquer quel système météorologique il désire utiliser (ici,

NARR). Tout d'abord, le logiciel fait la sélection des pixels NARR (32 x 32 km) faisant partie de la zone d'étude soumise par l'utilisateur. Ensuite, il procède à l'élimination des pixels dont la couverture de sol est à plus de 50% d'eau ou contenant des glaciers. Ceci permet de conserver une modélisation fidèle aux processus physiques du couvert nival, qui sont radicalement différents lorsqu'ils se trouvent au-dessus de plans d'eau glacés. Puis, le logiciel procède à la génération des fichiers de configuration de SNOWPACK (.ini, .sno et .smet) et lance les simulations SNOWPACK pour chaque pixel choisi. Il valide la réussite des simulations par SNOWPACK et transmet des messages d'erreurs pour indiquer tout problème. Enfin, il crée un fichier *shapefile* commun à tous les pixels de la simulation et compilation des informations sur le couvert nival, ainsi qu'un fichier *raster* selon la période de l'année et le paramètre demandé par l'utilisateur. Ceux-ci peuvent donc être utilisés comme intrants dans des SIG ou d'autres modélisations, telles que dans le modèle MaxEnt.

L'OSSA est un outil fonctionnant à partir du logiciel ArcMap de la suite ArcGIS, logiciel produit par la compagnie ESRI. Toutes les manipulations géomatiques mentionnées plus haut sont facilement opérables par quelqu'un ayant une connaissance de base du logiciel. Les résultats sortants de l'utilisation de l'OSSA sont des cartes de type vectoriel ou matriciel montrant plusieurs paramètres, notamment l'épaisseur cumulée ou l'équivalent en eau de la neige (*snow water equivalent*, SWE) de la neige. La résolution de ces cartes est la même que celle des réanalyses climatiques mais ensuite ramenée à 1 x 1 km suivant la méthodologie présentée par Beaudoin-Galaise (2016).

## 2.4 Création de modèles de prédiction de l'habitat avec le logiciel MaxEnt

### 2.4.1 Les modèles de prédiction de l'habitat

La niche écologique est définie comme l'ensemble des conditions nécessaires pour que le taux de naissances d'une espèce soit égal ou supérieur à son taux de survie, donc qu'une population survive (Chase et Leibold, 2003). Lorsque les composantes de la niche écologique d'une espèce sont déterminées, il devient alors possible de modéliser celle-ci par un procédé que l'on appelle la modélisation de la distribution des espèces (MDE), qui utilise les composantes principales de la niche écologique d'une espèce pour en déterminer la présence ou en un endroit particulier.

Ces modèles se basent généralement sur des données présence et d'absence d'une espèce. Or, les données d'absence d'une espèce sont très souvent non disponibles, et particulièrement difficiles à interpréter. Hirzel *et al.* (2002) explique ceci par trois raisons principales : « (1) l'espèce peut ne pas être détectée même si elle est présente, (2) pour des raisons historiques, l'espèce peut être absente d'un site même s'il est adéquat pour celle-ci ou (3) l'habitat est vraiment inadéquat pour l'espèce (traduction libre) ». On comprend alors que ce qui est considéré comme une absence ne l'est pas nécessairement, ce qui peut introduire de multiples biais dans l'étude. Dans le doute sur la qualité des données d'absence, il vaut donc mieux utiliser des modèles spécialisés dans l'analyse des données de type 'présence' seulement (Hirzel *et al.*, 2002). Plutôt que d'utiliser des modèles linéaires généralisés (GLM), des modèles et logiciels spécifiquement adaptés à ces situations ont été créés. Brotons *et al.* (2004) ont montré que ces modèles génèrent de meilleurs résultats lorsque l'on utilise que des données de présence que par l'utilisation des GLM.

La modélisation de la distribution des espèces avec les données de type 'présence' seulement se fait généralement en quatre étapes principales, soit : « (1) la compilation de données d'occurrence d'une espèce; (2) l'extraction de valeurs prédictives environnementales pour chacune des occurrences à partir d'une base de données géospatiales; (3) la création d'un modèle utilisant les données environnementales pour estimer la similarité aux sites d'occurrence; et (4) l'utilisation du modèle pour la prédiction de la variable d'intérêt dans la région d'intérêt (et peut-être dans un climat futur ou passé) » (Hijmans et Elith, 2017, traduction libre).

#### 2.4.2 Le logiciel MaxEnt

Le logiciel MaxEnt est probablement la méthode de modélisation de la distribution des espèces la plus utilisée actuellement dans le domaine de la biogéographie et de l'écologie en excluant le logiciel R (Ahmed *et al.*, 2015). Phillips *et al.* (2006) la décrivent comme étant une méthode générale pour caractériser des distributions de probabilité et en tirer des prédictions à partir d'informations incomplètes. Le résultat de l'utilisation du logiciel MaxEnt est une distribution de la probabilité de retrouver un individu de l'espèce dans chaque cellule du territoire, sous forme logistique, en fonction de chaque variable environnementale significative.

Le logiciel MaxEnt a donc pour but premier d'estimer la probabilité de distribution de l'espèce à l'étude. Ce but est atteint en déterminant la distribution ayant l'entropie maximale, d'où le logiciel tire son nom. L'entropie maximale indique que la distribution est la plus proche possible de l'uniformité. La contrainte principale est que la valeur estimée du modèle final de chaque variable environnementale qui est utilisée doit être dans la moyenne de la distribution totale. Tarkesh et Jetschke (2012) complètent en expliquant que « MaxEnt formalise le principe que la distribution estimée doit être en accord avec tout ce qui est connu (ou interpolé à partir des conditions environnementales aux locations d'occurrences), mais devrait éviter de placer toute contrainte ». Pour ce qui est du fonctionnement de l'algorithme, il s'agit d'un fonctionnement itératif qui corrige le poids de chaque variable à chaque itération. Il est généralement recommandé d'utiliser plus de 500 itérations, ainsi que d'utiliser les options du logiciel qui permettent de contrôler pour la surparamétrisation du modèle (Ortega-Huerta et Peterson, 2008).

Le logiciel MaxEnt laisse beaucoup de latitude à l'utilisateur pour l'optimisation du modèle. Ce dernier est basé sur une série de variables environnementales qui doivent appartenir à une de ces six classes : linéaire, quadratique, catégorique, produit (*product*), seuil (*threshold*) et charnière (*hinge*). Le fait que le logiciel MaxEnt soit en mesure d'utiliser tous ces types de données est extrêmement utile, et donne donc un avantage certain pour son utilisation face aux autres alternatives. D'autres options du logiciel incluent la possibilité de faire des validations croisées (*cross-validation*) pour le choix des variables significatives à la présence de l'espèce, et de faire l'utilisation de pseudoabsences, aussi appelées « *background data* » (Phillips, 2009). La création de pseudoabsences est faite par le logiciel en choisissant aléatoirement des points (généralement environ 10 000 points) dans la zone d'étude où il n'y a pas de présence de l'espèce d'associée (Merow *et al.*, 2013). Ceci permet d'éviter de choisir la distribution géographique de l'espèce dans les conditions du modèle de base et de viser davantage sa niche écologique.

#### 2.4.3 Données et modélisation

Les données télémétriques utilisées pour les modèles de prédiction de l'habitat ont été acquises auprès du Gouvernement du Nunavut, par l'entremise du Service Canadien de la Faune d'Environnement Canada (Jenkins et Lecomte, 2012). Des colliers satellitaires Argos ont été installés sur sept (7) femelles du Complexe d'Îles de Bathurst (CIB). Ces colliers ont récolté des

points d'avril 2003 à mai 2006. Pendant les mois d'avril, mai et juin, un point GPS a été récolté à tous les deux jours. Pendant les autres mois (juillet à mars inclusivement), un point a été récolté tous les cinq jours. Un total de 2265 points ont donc été récoltés. Dans le tableau 1, on peut voir le nombre de points pour chacune des trois saisons biologiques du caribou.

**Tableau 1 : Nombres de points télémétriques GPS disponibles dans le Complexe d'Îles de Bathurst selon les trois saisons biologiques du Caribou de Peary.**

Saison biologique du caribou	Mois de l'année	Nombre de points GPS disponibles
Alimentation estivale et rut	Juillet à octobre	559
Mouvement d'automne et alimentation hivernale	Novembre à mars	627
Mouvement printanier et mise bas	Avril à juin	1079

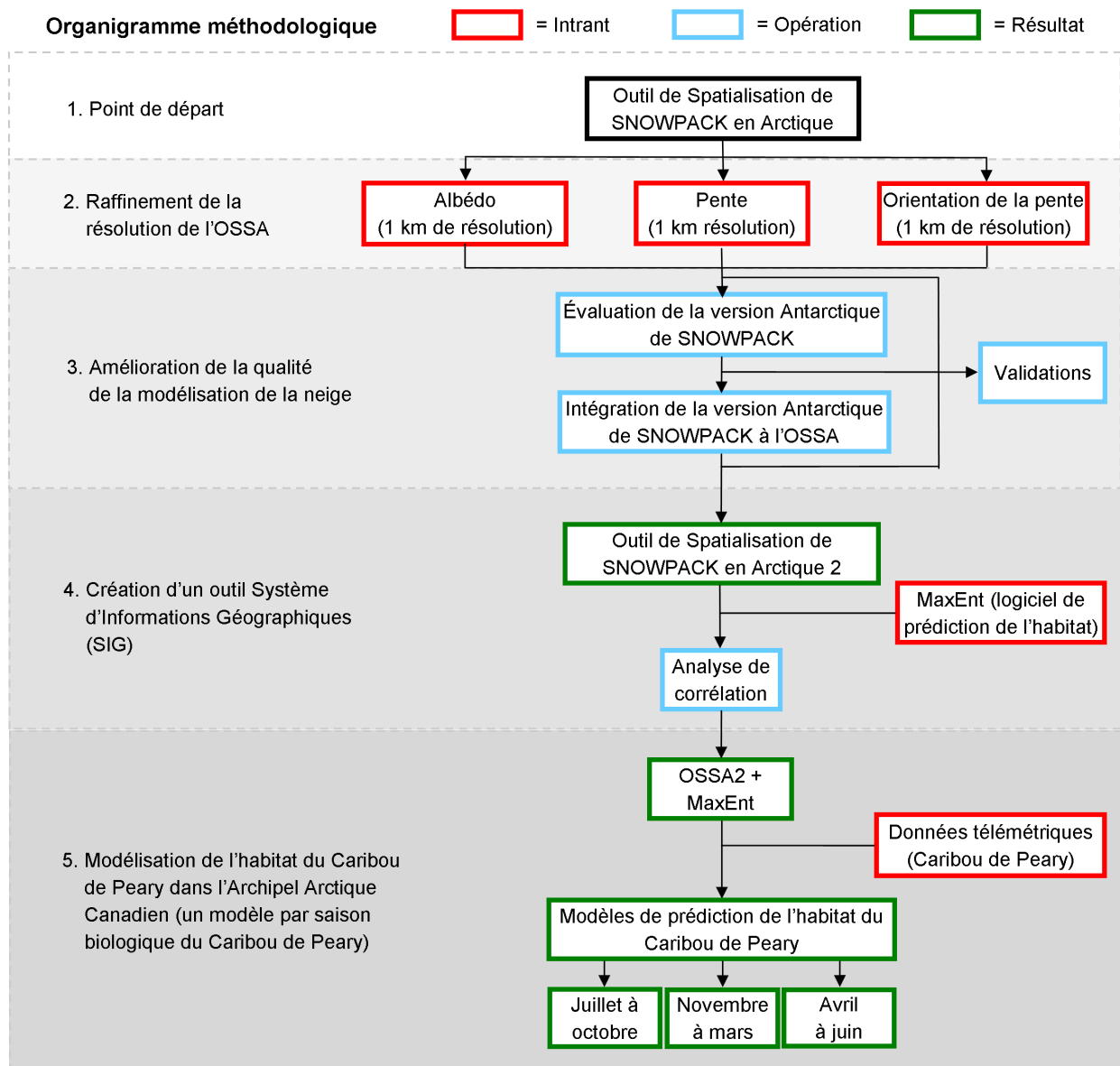
La modélisation de l'habitat du caribou dans MaxEnt se fera en trois parties, soit une pour chacune des saisons biologiques du Caribou de Peary présentées dans le tableau 1. De cette façon, il sera possible de déterminer les différents types d'utilisation du paysage tout au long de l'année, en lien avec le comportement du caribou. Il s'agit de la même façon de procéder que Johnson *et al.* (2016) ont utilisée pour faire un premier modèle de l'habitat du Caribou de Peary à la grandeur de l'Arctique. Or, comme nos modèles utiliseront des données à résolution spatiale plus fine que les modèles de Johnson *et al.* (2016) (1 x 1 km contre 32 x 32 km), nous pensons obtenir un degré de compréhension supplémentaire de la biologie du caribou de Peary, notamment au niveau de l'impact de la neige sur son utilisation du territoire.

Davantage de détails sur la méthodologie et les résultats obtenus sont décrits dans la section 3 (article scientifique), ainsi qu'à l'annexe 1 (résultats complémentaires).



### 3. Méthode

Le projet de maîtrise a été divisé en plusieurs volets (Figure 4). Les grandes étapes étaient (1) le raffinement de la résolution de l'OSSA, (2) l'amélioration de la qualité de la modélisation de la neige par SNOWPACK, (3) la création d'un outil système d'informations géographiques, et enfin, (4) la modélisation de l'habitat du caribou de Peary selon ses trois saisons biologiques.



**Figure 4 : Organigramme méthodologique.**

### 3.1 Objectif 1 : Raffinement de la résolution de l'OSSA

Tout d'abord, l'OSSA avait une résolution spatiale de 32 x 32 km (Ouellet *et al.*, 2016), ce qui n'était pas assez précis pour notre objectif principal. L'OSSA a été adapté afin d'avoir une résolution de 1 x 1 km. Pour ce faire, nous avons inclus de nouvelles variables afin d'affiner la résolution spatiale. En effet, les modèles de réanalyses climatiques actuellement utilisés (NARR et MRCC) ont une résolution spatiale trop grossière (respectivement 32 x 32 et 45 x 45 km de résolution respectivement). Les variables choisies sont donc l'albédo du sol, la pente, ainsi que l'orientation de la pente, tel que présenté dans les travaux de Beaudoin-Galaise (2016). Ces trois variables ont une influence directe sur le couvert nival. L'albédo du sol influence la température du sol, et donc le moment auquel le couvert nival commencera à s'accumuler. La pente, quant à elle, influence directement la rétention et l'accumulation de la neige sur la surface. Enfin, l'orientation de la pente est un proxy de la quantité de rayonnement solaire sur la surface, ce qui influence la fonte de la neige. Les trois variables ont été utilisées à une résolution spatiale de 1 x 1 km. Des travaux préliminaires ont permis de vérifier que ces variables ont une influence sur la modélisation de la neige dans l'OSSA pour des pixels partageant le même forçage météorologique (i.e. NARR) mais avec des variables de sol et topographiques différentes (Beaudoin-Galaise, 2016).

### 3.2 Objectif 2 : Amélioration de la qualité de la modélisation de la neige

Avant tout, le modèle SNOWPACK, utilisé par l'OSSA pour la modélisation de la structure du couvert nival, a été développé pour la prédiction d'avalanches en environnement alpin dans les alpes suisses (Bartelt et Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002a, 2002b). Le modèle n'est donc pas particulièrement adapté aux conditions arctiques. En effet, les gradients de températures dans le couvert nival en Arctique sont beaucoup plus importants qu'en environnement alpin, ce qui change complètement les résultats de la modélisation, notamment par rapport aux processus métamorphiques de la neige en l'absence d'un flux de vapeur provenant du sol qui crée une couche peu dense à la base du couvert nival (Gouttevin *et al.*, 2018) et d'une densification suffisante de la neige en surface en conditions de vents soutenus tel qu'observé en arctique. Des travaux futurs intégreront la méthode de Gouttevin *et al.* (2018). L'utilisation de la nouvelle version de SNOWPACK développée pour l'environnement antarctique de Groot Zwaafink *et al.*

(2013) améliore grandement la qualité de la simulation de la densité simulée des couches de neige pour les rendre plus réalistes. Cette notion est abordée avec plus de détails dans l'article soumis, en section 4 du présent mémoire.

### *3.3 Objectifs 3 et 4 : SIG et modélisation de l'habitat*

À partir des simulations de neige améliorées, il sera possible de créer des modèles de prédiction de l'habitat du Caribou de Peary. Celui-ci sera créé avec le logiciel de modélisation de l'habitat MaxEnt. MaxEnt nécessite des données géoréférencées d'occurrence d'une espèce sur un territoire donné et un ensemble de variables environnementales (Elith *et al.*, 2011). À partir de ces informations, il modélise l'aire de distribution de l'espèce en créant un SIG. Le modèle obtenu est une distribution de la probabilité de retrouver un individu de l'espèce dans chaque cellule du territoire (Phillips et Dudik, 2008). Il faudra donc de déterminer les paramètres d'intérêt pour le caribou de Peary. Ceux-ci devront être préalablement choisis par leur pertinence biologique à l'espèce, puis sélectionnés statistiquement par la modélisation dans le logiciel MaxEnt. Les paramètres d'intérêts seront liés à des données télémétriques de 7 femelles récoltées sur un an sur le Complexe d'Îles de Bathurst au Nunavut (Jenkins et Lecompte, 2012).

#### 4. Article

L'article présenté a été soumis dans la revue Arctic (éditeur *Arctic Institute of North America*) le 28 avril 2020. Il est en processus de révision et devrait être publié au cours de l'année.

L'article est soumis dans sa version intégrale, en anglais seulement. Il a été écrit en collaboration étroite avec les auteurs cités : Alexandre Langlois, Cheryl Ann Johnson, Isabelle Gouttevin et Erin Neave.

La référence à utiliser pour citer cet article est la suivante :

*Martineau, C., Langlois, A., Johnson, C. A., Gouttevin, I., and Neave, E. (2020). Improving Peary caribou presence predictions in MaxEnt using spatialized snow simulations, Arctic (submitted).*

## **Improving Peary caribou presence predictions in MaxEnt using spatialized snow simulations**

Martineau, Chloé<sup>1,2</sup> (corresponding author), Langlois, Alexandre<sup>1,2</sup>, Johnson, Cheryl Ann<sup>1,3</sup>, Gouttevin, Isabelle<sup>4</sup>, and Neave, Erin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Sherbrooke

<sup>2</sup> Centre d'Études Nordiques

<sup>3</sup> Science & Technology, Environment and Climate Change Canada

<sup>4</sup> Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, Grenoble, France

Corresponding author: [chloe.martineau@usherbrooke.ca](mailto:chloe.martineau@usherbrooke.ca)

## Abstract

The Arctic has warmed at twice the global average over recent decades. Patterns in the spatial extent and mass balance of snow show a significant trend towards negative anomalies. The increase in occurrence of winter extreme events such as rain-on-snow, blizzards and heat waves, has a significant impact on snow thickness and density. Modified snowpack conditions decrease or completely prevent foraging by Peary caribou (*Rangifer tarandus pearyi*) by creating “locked pastures”, a situation where forage is present but not accessible under snow or ice. Prolonged and severe weather events have been linked to poor body condition, malnutrition, high adult mortality, calf losses, and major population die-offs in Peary caribou. Previous work has established the link between declines in Peary caribou numbers in the Canadian Arctic Archipelago and snow conditions. Here, we investigate whether snow simulations from the snow model SNOWPACK can help predict Peary caribou space use within the MaxEnt habitat modeling software. We model Peary caribou habitat use across three seasons: July-October (summer forage and rut); November-March (fall movement and winter forage); April-June (spring movement and calving). Our results show that including information about snow significantly improves model performance for all three seasons (Area Under Curve = 0.720, 0.917 and 0.727, respectively). More specifically, snow depth and density explain 65.1% of the probability of Peary caribou presence in July-October, 37.7% in November-March and 15.5% in April-June. This suggests that snow plays a significant role in explaining patterns of Peary caribou habitat use and highlights the importance for continued snow monitoring with climate change to understand its potential impacts to the species’ distribution.

**Keywords:** Arctic, climate change, MaxEnt, Peary caribou, rain-on-snow, snow density, snow depth, locked pastures, SNOWPACK, species distribution modeling.

## Résumé

L'Arctique s'est réchauffé deux fois plus vite que la moyenne mondiale dans les dernières décennies. Les modèles de l'étendue spatiale et du bilan de masse de neige montrent une tendance significative vers des anomalies négatives. L'augmentation de la fréquence des événements extrêmes hivernaux tels que la pluie-sur-neige, les blizzards et les vagues de chaleur a un impact significatif sur l'épaisseur et la densité de la neige. Les conditions modifiées du manteau neigeux diminuent ou empêchent complètement la recherche de nourriture par le caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*) en créant des «pâturages verrouillés», une situation où le fourrage est présent, mais non accessible sous la neige ou la glace. Des événements météorologiques prolongés et graves ont été liés à des mauvais états corporels, de la malnutrition, des mortalités chez les adultes, des pertes de veaux et à des événements massifs de décès chez le caribou de Peary. Des travaux antérieurs ont établi le lien entre le déclin du nombre de caribous de Peary dans l'Archipel Arctique Canadien et les conditions de neige. Ici, nous étudions comment les simulations de neige du modèle SNOWPACK peuvent aider à prédire l'utilisation du territoire du caribou de Peary en utilisant le logiciel de modélisation de l'habitat MaxEnt. Nous modélisons l'habitat du caribou de Peary sur trois saisons: juillet-octobre (alimentation estivale et rut); novembre-mars (mouvement d'automne et alimentation hivernale); avril-juin (mouvement printanier et mise bas). Nos résultats montrent que l'inclusion d'informations sur la neige améliore considérablement les performances du modèle pour les trois saisons (*Area Under Curve* = 0.720, 0.917 et 0.727, respectivement). Plus précisément, l'épaisseur et la densité de la neige expliquent 65.1% de la probabilité de présence du caribou de Peary en juillet-octobre, 37.7% en novembre-mars et 15.5% en avril-juin. Cela suggère que la neige joue un rôle important dans l'explication des profils d'utilisation de l'habitat du caribou de Peary et souligne l'importance



d'une surveillance continue de la neige avec les changements climatiques pour comprendre leurs impacts potentiels sur la répartition de l'espèce.

**Mots-clés:** Arctique, changements climatiques, MaxEnt, caribou de Peary, pluie-sur-neige, densité de neige, épaisseur de neige, pâturages verrouillés, SNOWPACK, modélisation de la distribution des espèces.

## 1. Introduction

The Arctic has warmed at twice the global average over recent decades due to a number of processes and feedbacks (Davy et al., 2018; Pithan and Mauritsen, 2014; Serreze and Barry, 2011). A direct consequence is the increased occurrence of winter extreme events (WEE), such as rain-on-snow (ROS) (Dolant et al., 2017; Liston and Hiemstra, 2011), blizzards (Day et al., 2018; Dolant et al., 2018) and a longer melt season (Derksen and Brown, 2012), that have significant impacts on how the cryosphere responds to climate change (Fountain et al., 2012). More specifically, patterns in the spatial extent and mass balance of snow (Derksen et al., 2016), sea ice (Serreze and Stoeve, 2015; Stroeve et al., 2014) and ice caps (Gardner et al., 2013; Papasodoro et al., 2015) show a statistically significant trend towards negative anomalies. Negative snow anomalies could impact many Arctic ecosystem processes because of the importance of snow in regulating surface energy balance, freshwater reservoirs and permafrost thermal regimes. Of particular relevance, seasonal snow cover plays an important role in the surface energy balance (Lund et al., 2017) through its high albedo and low thermal conductivity (Riche and Schneebeli, 2013; Domine et al., 2018), and it is a key hydrological variable, acting as an important freshwater reservoir (Barnett et al., 2005) and having major implications for permafrost thermal regimes (Romanovsky et al., 2010).

Despite recent progress in identification of ROS events from space-based observation in the Arctic (Grenfell and Putkonen, 2008; Dolant et al., 2016), very little is known about the spatial and temporal patterns of ROS or the occurrence of other WEE such as blizzards, and their cumulative impact on the surface energy balance and snow conditions. The densification of the snowpack through the formation of ice crusts or wind slabs will affect the survival of ungulates (e.g. caribou) by blocking their access to food (Putkonen and Roe, 2003; Hansen et al., 2019; Ouellet et al., 2017; Langlois et al., 2017). Both Vikhamar-Schuler et al. (2013) and Ouellet et al.

(2017) found that a threshold of  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  represents a critical snow density value associated with population declines of both Svalbard reindeer and Peary caribou. Dolant et al. (2018) further showed that sustained heavy winds contributed to snow densities above this threshold that resulted in a die off event for Barren-ground caribou on Prince Charles Island, Nunavut in 2015-2016.

Peary caribou were listed under the federal Species at Risk Act (SARA) in Canada in 2011 as endangered. Understanding how changing snow conditions influence the distribution and survival of Peary caribou will be important to the species' recovery (e.g. Ouellet et al., 2017). While the literature clearly demonstrates that snow conditions influence caribou survival (Hansen et al., 2019), no studies have investigated the potential for snow to influence or explain the distribution of Peary caribou across different seasons. One of the main limitations has been the lack of high-quality data characterising snow conditions across the Arctic Archipelago (Johnson et al., 2016). Ouellet et al. (2017) have created a platform that spatializes SNOWPACK simulations. This platform could enable us to model Peary caribou habitat using snow and other environmental variables in the MaxEnt software. MaxEnt is a species distribution modeling (SDM) tool used by biologists. It uses a set of georeferenced points and environmental predictors to predict species' distributions. Three periods are considered for the simulations: summer forage and rut (July to October), fall movement and winter forage (November to March) and spring movement and calving (April to June).

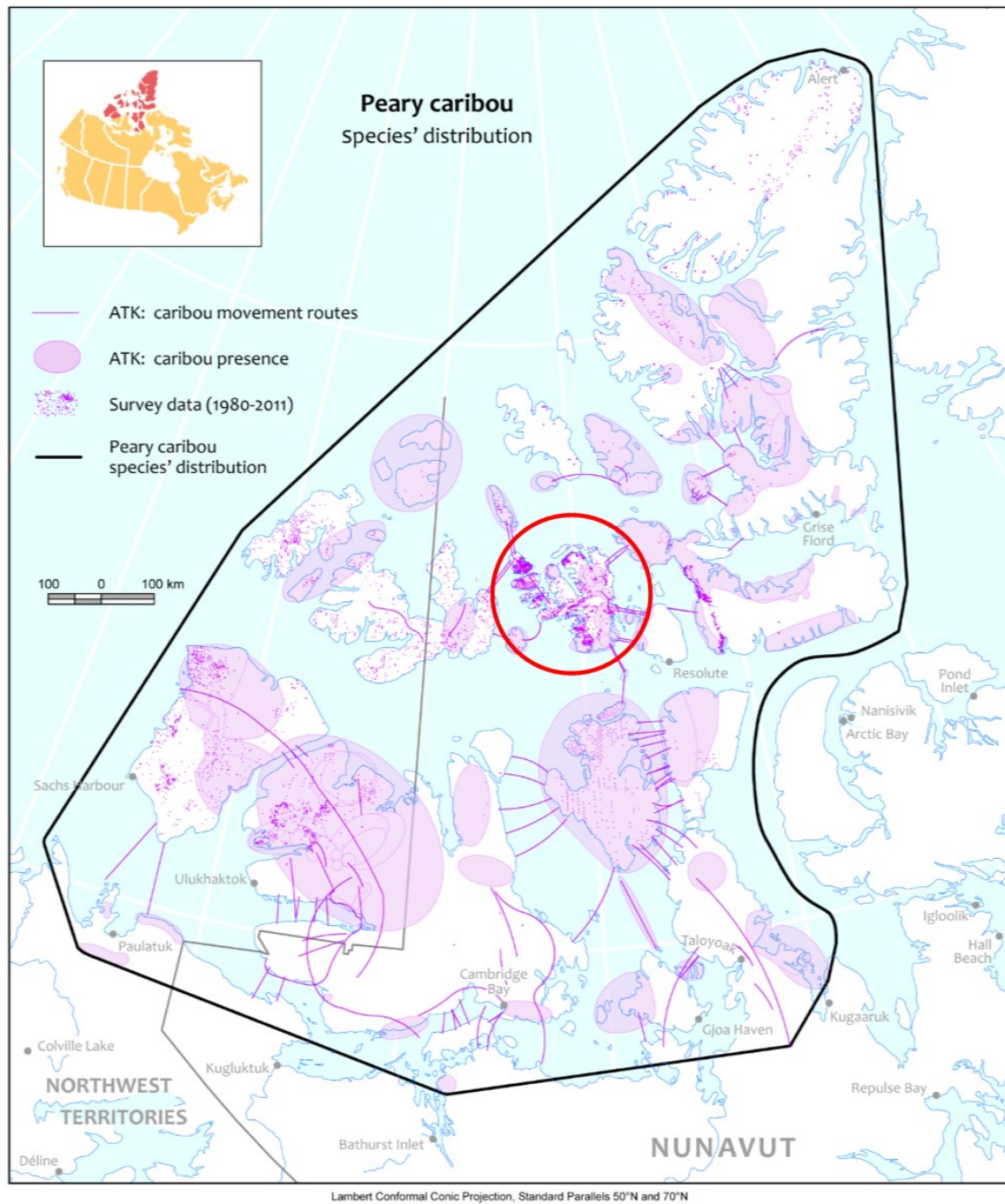
The objectives of this study are to: 1) characterize snow conditions over Bathurst Island Complex-BIC (Nunavut) using new modeling tools developed to better simulate polar snow conditions; and 2) evaluate the importance of snow in predicting Peary caribou space use

compared to other environmental variables e.g. vegetation, elevation and human disturbance (Johnson et al., 2016) using MaxEnt simulations.

This work is centred on two main hypotheses: 1) snow modeling at a 1-km resolution using elevation and vegetation will improve the variability of the simulations within the same atmospheric forcing pixel and 2) the inclusion of snow simulations adapted for the Arctic region in the MaxEnt model will be a significant predictor in Peary caribou habitat modeling. Our approach is novel in that it includes one of the first attempts to include snow characteristics generated from a snow model to predict Peary caribou space use.

## **2. Background: a context for Peary caribou**

In Canada, caribou are divided into twelve designatable units, which are evolutionarily significant units that are irreplaceable components of biodiversity (COSEWIC, 2011). Peary caribou, the designatable unit endemic to the Canadian Arctic Archipelago (CAA), occupies a territory larger than 1.9M km<sup>2</sup> across northern Nunavut and the Northwest Territories (Fig. 1) (COSEWIC, 2015). There are four distinct Peary caribou local populations (Johnson et al., 2016). This paper focuses on the Bathurst Island Complex (within the Western Queen Elizabeth Islands) local population; an area for which GPS collar information is available (area in the red circle in Fig. 1).



**Figure 1:** Peary caribou distribution defined using a standard convex polygon methodology using aerial counts, telemetry and traditional knowledge (1970-2015) (figure from Johnson et al., 2016). The red circle shows the Bathurst Island Complex study site.

Peary caribou (Fig. 2) are well adapted to harsh arctic conditions with dense fur, short muzzles, and wide hoofs (COSEWIC, 2004). Unlike adjacent designatable units that assemble in herds, Peary caribou live in small groups of five to ten individuals and move within and between islands in search of suitable forage (Miller et al., 1977). They select the most nutritious parts of a great variety of plants according to their seasonal availability, such as flower heads in the summer for their high energy content (COSEWIC, 2004), or legumes in the winter for their high digestibility and protein content (Larter et al., 2002). Overall, their habitat consists of arctic tundra and a highly variable topography from flat surfaces in the southwest area of the CAA (e.g. Victoria Island) to mountainous terrain to the northeast (e.g. Ellesmere Island).



**Figure 2:** Peary caribou (photo courtesy of Dr. Micheline Manseau ©)

We used the three biological seasons defined in Johnson et al. (2016) based on Peary caribou ecology. In the summer (from July to October), individuals increase fat reserves for winter and enter the rut (i.e. mating). Weather conditions are milder, but snow is still present throughout much of the summer season (Johnson et al., 2016). Peary caribou use a wide variety of mesic habitats (Thomas et al. 1999). They mainly eat rushes (*Luzula* spp.) and flowers, such as purple saxifrage (*Saxifraga oppositifolia*) (Parker and Ross, 1976; Thomas and Edmonds, 1983). The winter season, from November to March, is known as the survival period (COSEWIC, 2004). Winter is the most critical moment in the annual Peary caribou cycle affecting both adult survival rates and pregnancy rates (Thomas, 1982). Caribou are also most vulnerable to extreme weather conditions that could limit forage accessibility during winter (Dolant et al., 2018). For this reason, they use xeric habitats where snow is swept away by wind (Miller et al., 1977). Parker et al. (1975) and Thomas et al. (1976) have found that feeding craters frequently have mosses, rushes (*Luzula* spp.) and lichens. Peary caribou avoid meadows in the winter due to high snow depths (Thomas et al. 1999). The third and last season, spring, runs from April to June when the caribou move to calving grounds and give birth. This period is the most important for population growth. As females come out of the very physically challenging winter period, they need to increase their energy reserves for calving and lactation (Johnson et al., 2016). Female body condition influences adult survival and calf production (Thomas, 1982). They select the most nutritious plants available following snow melt and plant phenology in this season (Miller et al. 1977; Gunn and Fournier 2000). Miller and Barry (2003) also mention that calving habitats usually have snow-free patches of ground.

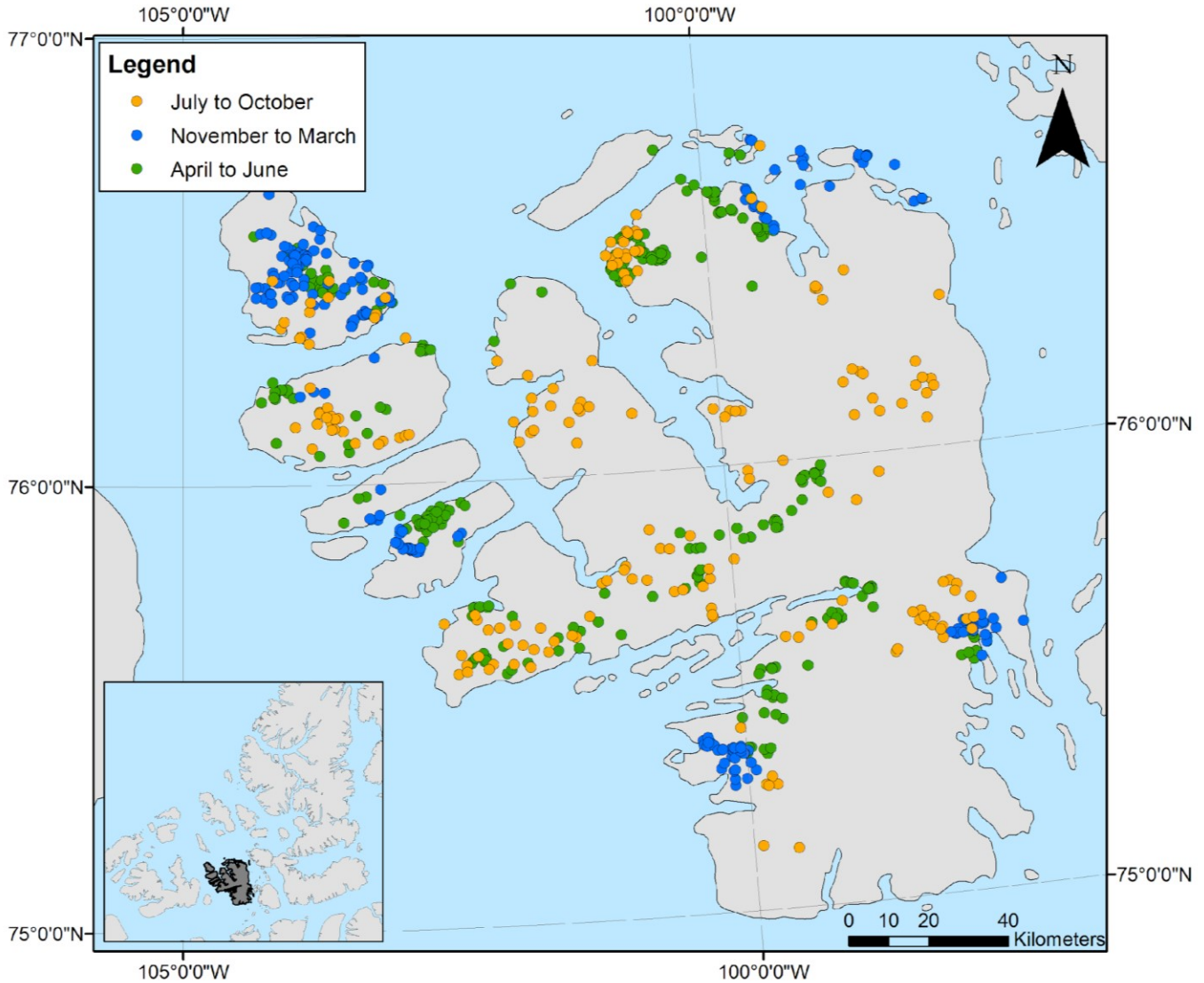
### 3. Data and methods

#### *3.1. Study site*

The study focused on the Bathurst Island Complex (BIC), located in the Queen Elizabeth Islands in Nunavut, Canada (Fig. 3). This region was selected because unique Peary caribou telemetry data is available. More specifically, our study area approximates 19,000 km<sup>2</sup> that includes Bathurst Island and five large islands (Cameron, Vanier, Alexander, Massey and Helena) and includes Qausuittuq National Park and Polar Bear Pass National Wildlife Area (Miller, 1995). The BIC is not inhabited, but Inuit from the community of Resolute Bay occasionally hunt on the island complex.

The vegetation in the BIC can be described as High Arctic semi-desert where the main plant functional types represented are cushion-forbs, dry graminoids, bryophytes, prostrate dwarf shrubs and cryptogams (Walker, 2000; Gould et al., 2003). The nearest meteorological station, which is in Resolute on Cornwallis Island (74.72 N, 94.97 W), shows that the average temperature in January is -32.0°C and +4.5°C in July. The annual precipitation rarely cumulates above 160 mm, making it one of the driest regions on Earth (Environment and Climate Change Canada, 2019).





**Figure 3.** Geographical distribution of the Peary caribou telemetry GPS points from July 2003 to June 2004 on the Bathurst Island Complex. The orange points represent the July to October positions, the blue points represent the November to March positions and the green points represent the April to June positions.

### 3.2 Telemetry data

The telemetry data (GPS collars) used for this study was acquired from the Government of Nunavut (Jenkins and Lecomte, 2012). Argos satellite collars were put on seven female Peary caribou in different areas of the BIC. Location data from the collars spanned from April 2003 to May 2006. We restricted our analyses from the period July 2003 to June 2004 because it allowed for better temporal matching with the snow data. More specifically, it alleviated potential loss of information on inter-annual variability in weather conditions associated with averaging across multiple years. GPS collars were programmed to collect one location every two days during the months of April through June, and one location every five days for the rest of the year. A total of 737 coordinate points were collected from the seven female caribou over the course of the year (Fig. 3). Table 1 shows the frequency of locations acquisitions by season.

**Table 1.** Number of available telemetry GPS points on the Bathurst Island Complex for each Peary caribou biological season from July 2003 to June 2004.

Caribou biological season	Months	Number of GPS points
Summer forage and rut	July to October	187
Fall movement and winter forage	November to March	209
Spring movement and calving	April to June	341

### 3.3 SNOWPACK snow model and its application over BIC region

Recently, a spatialization platform of the SNOWPACK (Lehning et al., 2002a; Lehning et al., 2002b) model was developed (Ouellet et al., 2017), which enables to overcome the lack of in-situ snow data in the Arctic. Like any snow thermodynamic models (i.e. Crocus, SNTHERM), SNOWPACK requires meteorological information as input. Because accurate meteorological information from weather stations can be seriously limited in Arctic regions (Langlois et al., 2012), we extracted meteorological data from the North American Regional Reanalysis (NARR, available 1979-present) from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Environmental Modeling Center (EMC). The horizontal resolution of NARR is 0.3 degrees (approximately 32 km) with a temporal resolution of 8 times daily (every 3 hours). The following data were extracted for input into SNOWPACK simulations for 2003-2004 at 32-km resolution: mean values of daily air (2-m) and surface temperatures ( $^{\circ}\text{C}$ ), relative humidity (%), wind speed ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), incoming/reflected shortwave and incoming longwave radiation ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) and cumulative precipitation over the 3-hour period ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  or mm). Bulk (depth, snow water equivalent-SWE) and profile (temperature, density, grain size, etc.) data are available for each time-step specified by the user. We extracted snow depth and the Cumulative Thickness of snow layers surpassing the critical density value of  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (CT350; Ouellet et al., 2017). CT350 is calculated by adding the thickness of the layers of snow whose density is greater than the threshold of  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  for each increment of three hours for the entire duration of the season. The number of layers varies according to the number of precipitation events and the predicted snow depth; the transition between solid and liquid precipitation is set at  $+1.2^{\circ}\text{C}$ .

The spatialized snow simulations, forced by NARR are rescaled to 1x1 km using land cover, topography and soil albedo information to better match the finer scale spatial resolution of the

Peary caribou location data. We visually inspected the SNOWPACK outputs to evaluate whether the use of 1x1km land cover, topography and albedo information introduced finer scale variation in snow conditions. From our first hypothesis, following Beaudoin-Galaise (2016) work, it is suggested that local variability from the soil configuration in SNOWPACK (i.e. topography, albedo, land cover) introduces variability despite the pixels sharing the same meteorological forcing information. Beaudoin-Galaise (2016) evaluated the sensitivity of the cumulated thickness of hard snow layers ( $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ : CT350) to variation in topography and soil occupation. Their results suggested that slopes greater than  $3^\circ$  will affect the CT350 values, depending on aspect with respect to main wind direction. The 1 km simulations allow us to use the information available from the GPS collars effectively; much of the finer scale information on habitat use would be lost by using the 32x32km resolution data for the snow variables.

Numerous problems are identified using SNOWPACK in open tundra environments. As such, Langlois et al. (2012) highlighted problems in microstructure with a large overestimation of snow grain size in strong kinetic metamorphism conditions. Domine et al. (2019) further investigated how energy transfer and thermal conductivity created problems in the snow profile, reporting a tendency to overestimate density values near the bottom of the snow cover. Although our research is not focused on microstructure, the problem in density profiles (Gouttevin et al., 2018) can be problematic when investigating changes in grazing conditions. Therefore, we used the Groot Zwaaftink et al. (2013) Antarctic version of SNOWPACK to improve density profile representation (hereafter referred to as Antarctic version). This version was empirically modified to assess for the harsh wind conditions of the Antarctic which contributes to hardening the top layer of the snow up to densities that can be as high as  $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . This version also only cumulates snow once a given wind speed threshold is surpassed to account for the very important

wind redistribution processes. From the simulations, we calculated snow depth and CT350 at the end of each biological season (Vikhamar-Schuler et al., 2013; Ouellet et al., 2017). Also, the Groot Zwaartink et al. (2013) approach only cumulates snow above a wind speed threshold of  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  so that we investigated if that value is reached at our snow sampling site. To do so, wind speed values were extracted from our own meteorological station near Cambridge Bay (69.06 N, -104.76W) (<https://grimp.ca/data/cambridge-bay-1/>) for the 2014-2015 winter season. Results suggest that the  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  is reached for 63.3% of the period justifying the use of the Antarctic version for our validation and use over BIC. It is not possible to evaluate the simulations directly over the BIC since no snow data are available there. Instead, data collected near Cambridge Bay (Nunavut) was used, where complete snow information is available since 2015 (Vargel et al., 2020) and where snow conditions are similar to BIC. Yearly field campaigns are conducted in this area, and measurements of snow depth, SWE, grain size, density, temperature, thermal conductivity and wetness are available (37 snowpits in the month of April). We do not describe the measurement methodology here for conciseness, simply that these are advanced geophysical measurements, in an Arctic environment, representative of the BIC complex. Further details on snow measurements can be found in Langlois et al. (2012; 2019).

### 3.4 Environmental predictor variables

Environmental predictor variables included in MaxEnt were selected based on knowledge of Peary caribou biology and factors suggested to influence the animals space use patterns (Table 2).

**Table 2.** Summary of data used in MaxEnt habitat models and major references justifying inclusion in this study.

Data	Source	Scale/Spatial resolution	Classes	Data type	Major references
Elevation	Canadian Digital Elevation Model (Natural Resources Canada, 2013)	90 meters	Continuous	DEM	Miller, 2002 Miller et al., 1977 Miller et al., 1982
Vegetation	Brazel (2006)	1:250 000	43 classes	Polygons	Larter and Nagy, 2001 Miller et al., 1982 Thomas et al., 1999
Disturbance	BASIN Geodatabase (Natural Resources Canada, 2019)	1:250 000	Continuous	Points	Indigenous Traditional Knowledge Miller et al., 1977 Taylor, 2005
Snow depth	SNOWPACK modeling	1 kilometer	Continuous	Raster	Johnson et al., 2016 Larter and Nagy, 2001 Miller and Gunn, 2003 Stien et al., 2010
CT350	SNOWPACK modeling	1 kilometer	Continuous	Raster	Hansen et al., 2019 Johnson et al., 2016 Ouellet et al., 2017 Stien et al., 2010 Vikhamar-Schuler et al., 2013

#### 3.4.1 Vegetation

The Brazel (2006) dataset is a characterization of the BIC vegetation. This product is a vector digitization of seven maps from the Queen Elizabeth Islands vegetal communities produced by the Geological Survey of Canada. Since this dataset was digitized, the error can go up to 250 meters. The maps were created from field surveys conveyed in 1986 where the vegetation is

divided in 43 classes, which is precise enough to target the important areas for the Peary Caribou. The classes describe the habitat by first and second most common group of species in the area (*Luzula*, lichen, purple saxifrage, etc.) or by type of cover (lake, wetland, unvegetated area, etc.)

#### *3.4.2 Disturbance*

The potential impacts of increasing anthropogenic development in the Arctic region on Peary caribou are not well understood (COSEWIC, 2015). Current disturbance data was included in the model consisting of GPS points of permanent human structures located on the BIC. Since the BIC is uninhabited, the only structures were oil exploration wells abandoned in the 1990s. While there are very few of these locations, we integrated them because Peary caribou are sensitive to anthropogenic features according to local Indigenous Knowledge (Miller et al., 1977; Canadian Wildlife Service, 2013; Taylor, 2005).

#### *3.5 Configuration of the MaxEnt model for the characterization of Peary caribou habitats over BIC*

MaxEnt is a distribution modeling software package that is one of the most widely used for species distribution modeling in the fields of biogeography and ecology (Ahmed et al., 2015). MaxEnt is very popular because it offers users many different methods and settings to create species distribution using maximum entropy (Phillips and Dudík, 2008; Phillips et al., 2017). Phillips et al. (2006) describes the model as a general approach for the characterization of probability distributions and for deriving predictions from incomplete information (presence-only

data). Environmental variables are used to predict habitat quality, using GPS locations of the studied species.

In this study, we created three different MaxEnt models, one for each of the Peary caribou biological seasons. Modeling every season separately allows us to capture variations in behavior to changing environmental conditions (Johnson et al., 2016). All the data was transformed into raster format with pixels of 1 square kilometer (1 by 1 km). In addition, all variables were modified to have the same geographical extent, and therefore the same number of pixels. The variables were all tested for collinearity, and no relationship was found to be significant between any of the variables (supplementary material, table 6).

We used a forward selection of predictor variables for inclusion in MaxEnt models. First, we ran models for each predictor variable separately, and retained only the resulting in models with an Area Under Curve (AUC) value above 0.6 for our models with multiple variables (i.e. improved the AUC value). AUC values are used to evaluate model performance. A value of 0.5 is no better than random, whereas a model with an AUC value greater than 0.7 is considered to have an excellent score (Elith et al., 2006). More specifically, we selected the model(s) with the highest AUC value, and systematically added the remaining predictor variables one at a time to assess their effects on model performance. Each model was tested with 10-fold cross-validation (Kohavi, 1995) and we used the average output of these models to assess model performance. The number of background points was set to 10,000 for optimal convergence and 1,000 iterations were performed on the practice model. Akaike Information Criterion (AIC) values were also generated to further evaluate model performance, where the best models in the candidate set are characterized by the lowest AIC values (Anderson et al. 2000).

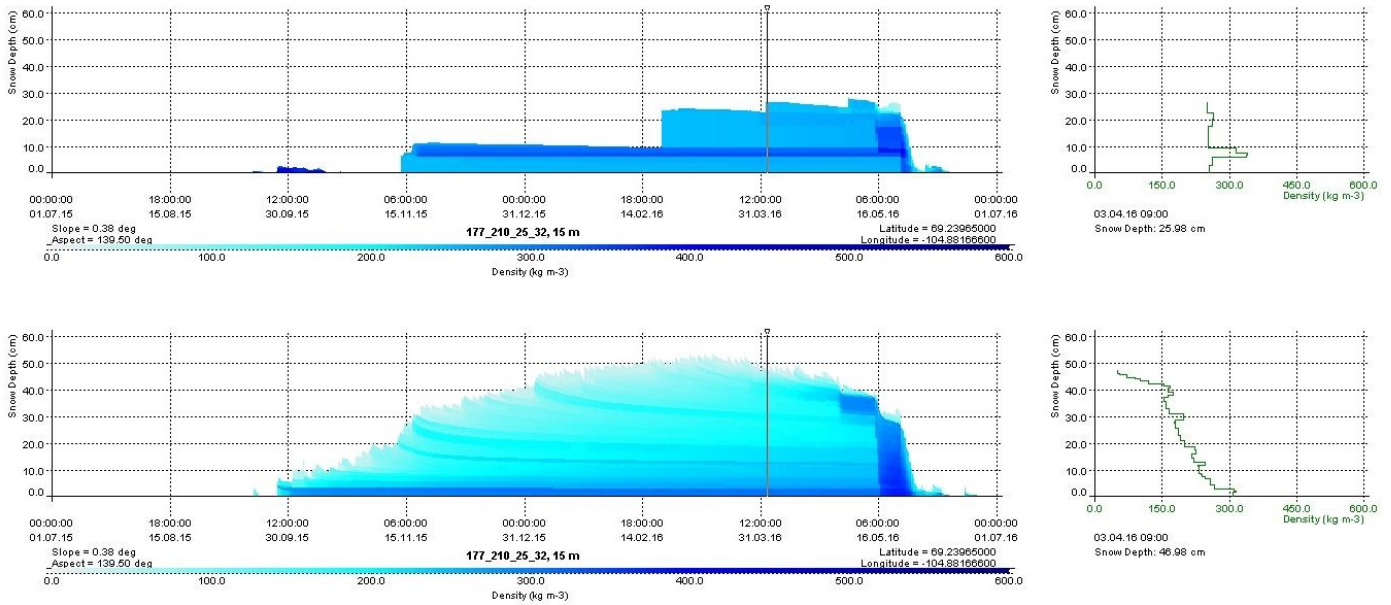


## 4. Results

### 4.1 Characterization of snowpack conditions on BIC using the SNOWPACK model

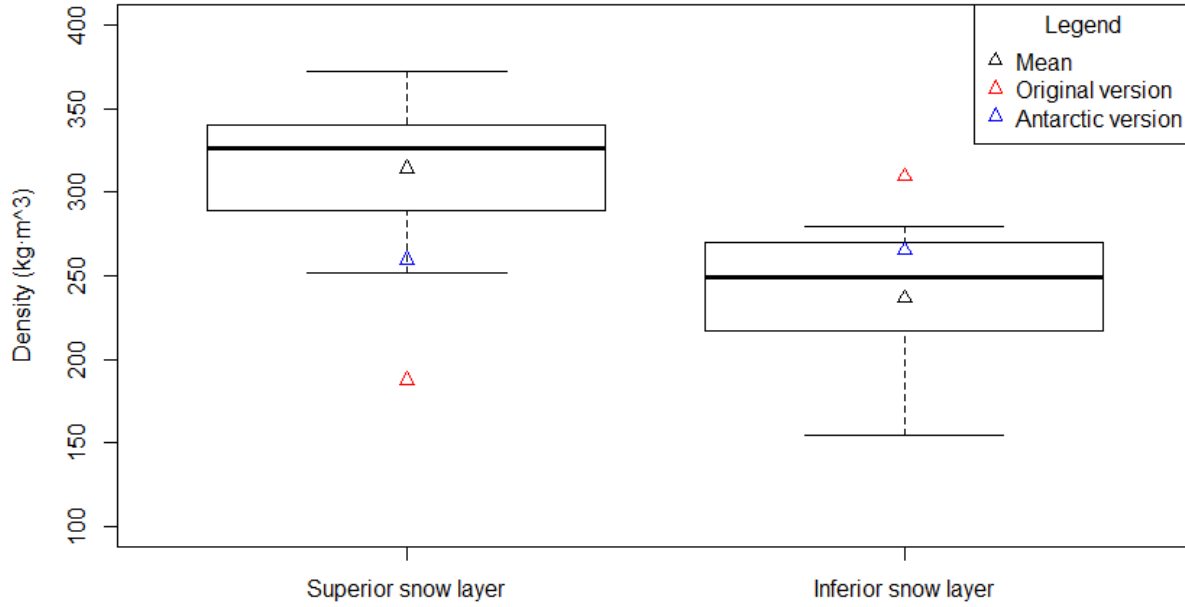
#### 4.1.1 Evaluation of SNOWPACK simulations in Arctic context

Using the Antarctic version over the Cambridge Bay meteorological study site greatly improved snow thickness and density simulations, critical parameters to monitor caribou habitat (Fig. 4). We conducted two simulations using 1) the original SNOWPACK version (Fig. 4, bottom graphs) and 2) using the Antarctic version (Fig. 4, top graphs). Both were forced with NARR data and downscaled at 1-km using local topography, albedo and soil type information.



**Figure 4.** Comparison of the density profiles (colors) with Antarctic SNOWPACK version (top simulation) and standard version (bottom simulation) at Cambridge Bay site. Graphs on the right show the density values on April 3<sup>rd</sup>, 2016 (corresponding to vertical black lines in left graphs), when field measurements of snow density are available.

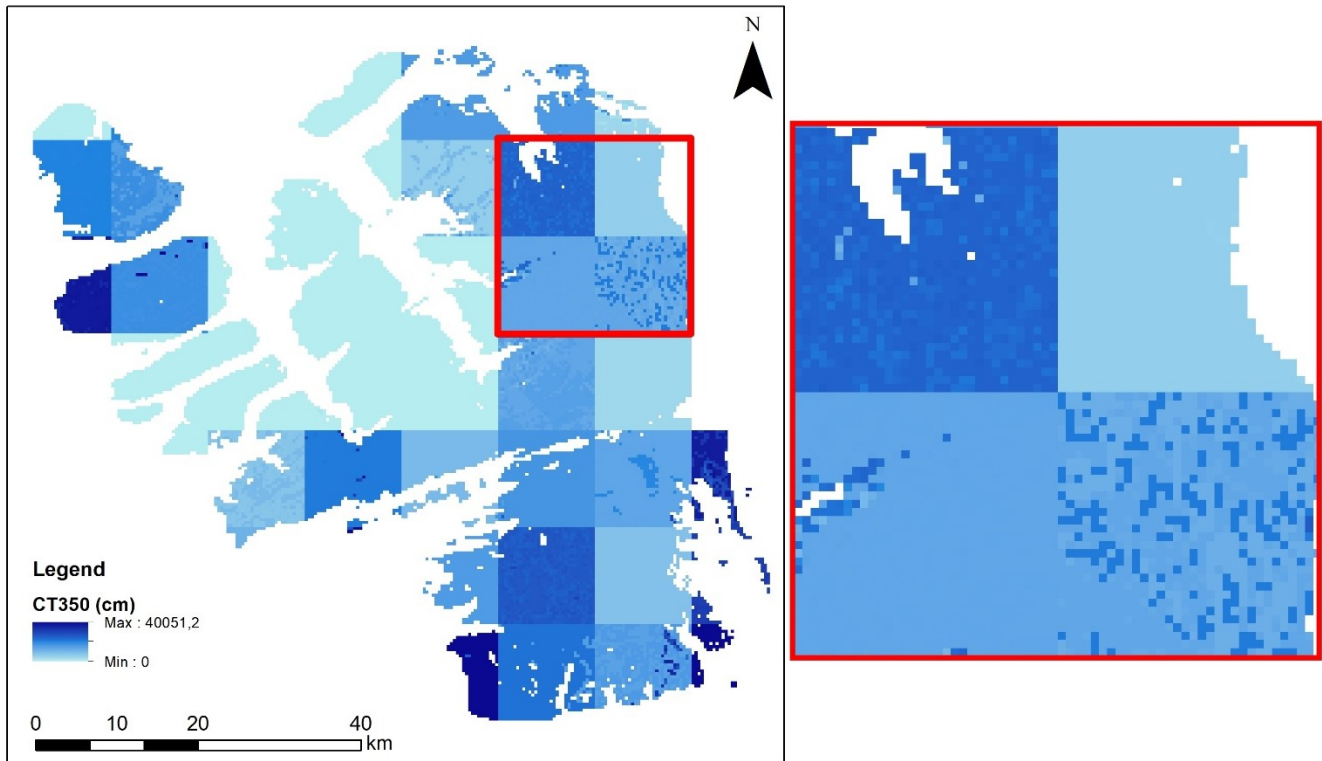
Figure 4 shows SNOWPACK simulations at Cambridge Bay where snow data were collected. In this figure (bottom graphs), one can clearly recognize the density profile inversion discussed in the literature, problematic for arctic snow covers (Gouttevin et al., 2018; Domine et al., 2019), but also an overestimation of snow depth (50 cm on bottom graph compared to 27 cm on top graph on Fig.4). We compared the density simulated by SNOWPACK to snow measurements collected at Cambridge Bay snowpits during winter 2016. Two main layers were analyzed: 1) the top layer mainly consisting of drifted snow and 2) the lower layer consisting in depth hoar, i.e. large snow grains forming a low-density snow layer. Results from Figure 5 show that the original version of SNOWPACK (circle) largely underestimate the top layer density values while the bottom layers density is strongly overestimated, both outside of the range from field measurements (boxplots). When using the Antarctic version (triangles), both top and bottom density values greatly improve, and become consistent with the observed snow density standard deviation for density in these layers. More specifically, top layer density values are improved by 38.4% at  $260 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  while the bottom values are improved by 14.2% at  $265 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . In our case, we are mostly interested in the top layer (i.e. high-density layer) since it is the targeted layer to characterize Peary caribou foraging conditions. The top layer density was therefore improved, but remained underestimated compared to on-site measurements.



**Figure 5.** Simulations of top and bottom snow layers density with the original SNOWPACK version (circles) and using the Antarctic version (triangles). Values are compared with field observations (box plots), where the black line is the median. The mean of field observations is a cross.

#### 4.1.2 Evaluation of SNOWPACK downscaling to 1 km over BIC

Soil albedo has an impact on snow onset timing, however the small albedo variability over our study sites (between 13% and 20%) does not suggest a great sensitivity of snow cover duration, so the gained variability is mostly linked to topography. That gained variability is highlighted in Figure 6, where the CT350 varies from about 0 to 40000 cm, suggesting that the approach of using 1-km simulations can be justified, at reasonable accuracy for density and thickness as discussed above. Given the observed improvement in density simulations, the same approach was applied over BIC from July 2003 to June 2004.



**Figure 6.** Spatial variability of CT350 for the April to June biological season on Bathurst Island Complex (Nunavut, Canada) induced by topography at 1 km scale.

The modelled snow conditions over BIC from July 2003 to June 2004 are described in Table 3. As expected, maximal snow depth increases throughout the year, as does maximal CT350. The maximum value of CT350 occurs in April to June (40051.0 cm). The mean CT350 values are also really high in the November to March and April to June biological seasons (respectively 4134.6 and 4351.8 cm). As Ouellet et al. (2017) stated, there are clearly many locked pastures where it is impossible for Peary caribou to graze during winter and spring.

**Table 3.** Descriptive statistics of the modelled snow for each biological season using the Antarctic version.

Variable	Biological season	Min (cm)	Max (cm)	Mean (cm)	Std. dev. (cm)
Snow depth	July to October	0	16.9	5.6	2.0
	November to March	6.1	75.6	38.1	7.6
	April to June	0	132.3	35.5	18.9
CT350	July to October	0	3907.0	624.7	570.0
	November to March	0	26624.0	4134.6	5449.8
	April to June	0	40051.0	4351.8	6356.7

## 4.2 Caribou habitats over the 3 biological seasons

### 4.2.1. MaxEnt models and explanatory variables

Overall, all three models performed well (Table 4). At least one snow variable was found significant in every model (snow depth or CT350). It is worth noting that the disturbance variable was never found significant. The results associated with the model adopted for each caribou biological season are described in Table 4. For the July to October season, the top ranked model based on AIC scores has three significant variables and an AUC value of 0.720. For the season from November to March, the model has four significant variables and an AUC value of 0.917. The April to June model has an AUC value of 0.727. The November to March model is by far the best model of the three, but it remains quite interesting to have significant AUC (i.e. >0.7) for each of the biological season when snow is considered. This November-March AUC value is 26.13% higher than the April-June model, and 27.36% higher than the July-October model.

**Table 4.** Results of the forwards statistical procedure which allowed to choose the final model for each of the biological seasons. The variables whose AUC value was below 0.600 were not kept (in italics). The bolded models were kept because they had the highest AUC value and lowest AIC value.  $\Delta$ AIC shows variation between the model and the final model.

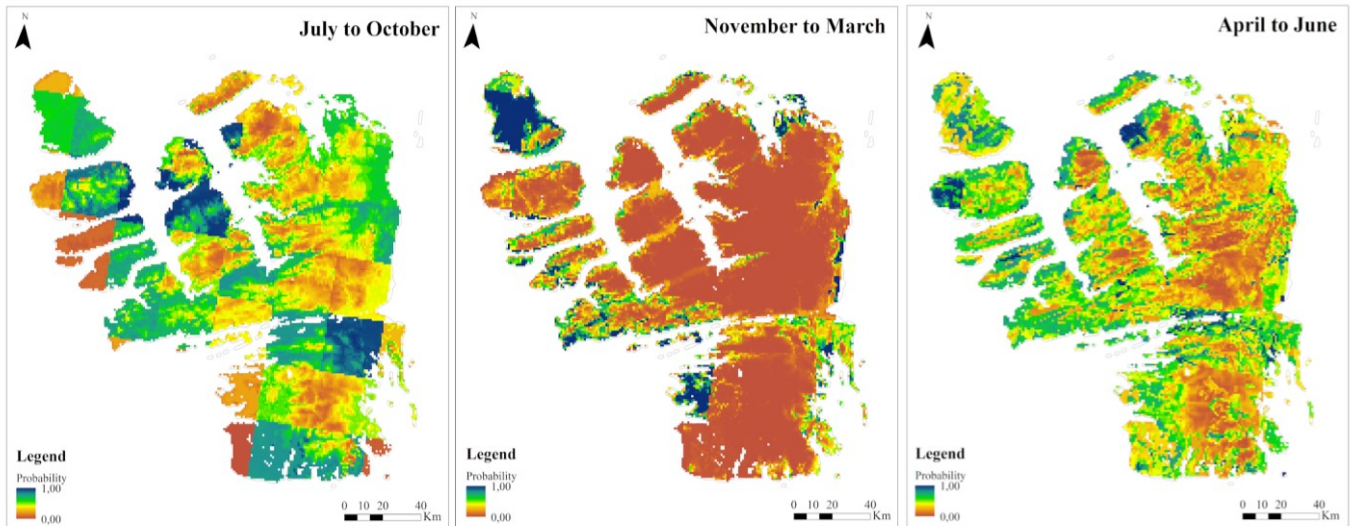
Biological season	Model	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	AUC value	AIC value	$\Delta$ AIC	Weight
July to October	1	<i>Disturbance</i>	-	-	-	0.500	3383.6	92.1	0.00
	2	<i>Vegetation</i>	-	-	-	0.547	3593.0	301.5	0.00
	3	Elevation	-	-	-	0.610	3363.0	71.5	0.00
	4	CT350	-	-	-	0.642	3353.5	62	0.00
	5	Snow depth	-	-	-	0.648	3340.1	48.6	0.00
	6	CT350	Elevation	-	-	0.655	3346.7	55.2	0.00
	7	Snow depth	Elevation	-	-	0.681	3325.1	33.6	0.00
	8	Snow depth	CT350	-	-	0.700	3311.6	20.1	0.00
	<b>9</b>	<b>Snow depth</b>	<b>Elevation</b>	<b>CT350</b>	-	<b>0.720</b>	<b>3291.5</b>	<b>0.0</b>	<b>1.00</b>
November to March	10	<i>Disturbance</i>	-	-	-	0.500	3700.2	605.9	0.00
	11	CT350	-	-	-	0.705	3612.1	517.8	0.00
	12	Snow depth	-	-	-	0.742	3466.9	372.6	0.00
	13	Vegetation	-	-	-	0.743	3890.3	796	0.00
	14	Elevation	-	-	-	0.818	3421.4	327.1	0.00
	15	Vegetation	CT350	-	-	0.798	3417.0	322.7	0.00
	16	Snow depth	CT350	-	-	0.805	3401.7	307.4	0.00
	17	Snow depth	Vegetation	-	-	0.844	3327.8	233.5	0.00
	18	Elevation	CT350	-	-	0.858	3365.2	270.9	0.00
	19	Elevation	Vegetation	-	-	0.871	3271.7	177.4	0.00
	20	Elevation	Snow depth	-	-	0.881	3249.9	155.6	0.00
	21	Snow depth	Vegetation	CT350	-	0.879	3276.9	182.6	0.00
	22	Elevation	Vegetation	CT350	-	0.884	3225.1	130.8	0.00
	23	Elevation	Snow depth	CT350	-	0.891	3230.2	135.9	0.00
	24	Elevation	Snow depth	Vegetation	-	0.904	3129.5	35.2	0.00
	<b>25</b>	<b>Elevation</b>	<b>Snow depth</b>	<b>Vegetation</b>	<b>CT350</b>	<b>0.917</b>	<b>3094.3</b>	<b>0.0</b>	<b>1.00</b>
April to June	26	<i>Disturbance</i>	-	-	-	0.500	6252.7	246.4	0.00
	27	<i>CT350</i>	-	-	-	0.575	6270.8	264.5	0.00
	28	Vegetation	-	-	-	0.677	6418.1	411.8	0.00
	29	Elevation	-	-	-	0.619	6197.2	190.9	0.00
	30	Snow depth	-	-	-	0.602	6227.3	221	0.00
	31	Vegetation	Snow depth	-	-	0.709	6078.3	72	0.00
	32	Altitude	Snow depth	-	-	0.675	6166.3	160	0.00
	33	Vegetation	Elevation	-	-	0.708	6041.6	35.3	0.00
	<b>34</b>	<b>Vegetation</b>	<b>Elevation</b>	<b>Snow depth</b>	-	<b>0.727</b>	<b>6006.3</b>	<b>0.0</b>	<b>1.00</b>

**Table 5.** Description of the selected models for each Peary caribou biological season. Each significant variable in the model is accompanied of its relative percentage of contribution.

	July to October	November to March	April to June
AUC value	0.720	0.917	0.927
Elevation	34.9%	44.2%	20.6%
Snow depth	41.3%	29.6%	15.5%
Vegetation	-	18.1%	63.9%
CT350	23.8%	8.1%	--

#### *4.2.2. Habitat models results analysis*

The chosen model for the July to October season has three significant variables: snow depth (41.3%), elevation (34.9%), and CT350 (23.8%) (Table 5). The snow variables were included in this model, because at a latitude of more than 75 degrees, snow patches can be found throughout the year. On the graphical representation of the model (Fig. 7), caribou seem to select low to mid-elevation habitats, as well as low snow depths and density. This season is a critical moment for accumulating fat reserves, which could mean that they would avoid snow patches to preserve energy. The mean value of pixels in this model, which represent habitat suitability or presence probability, is  $0.66 \pm 0.24$ . The habitat suitability over BIC is very good, the mean value being over 0.5.



**Figure 7.** Graphical representation of the habitat model for every Peary caribou biological seasons. The red to yellow colors show habitats that will be avoided by the caribou during the season shown (presence probability 0.00 to 0.50), and the green to blue colors show habitats that will be selected by the caribou (presence probability 0.50 to 1.00).

The November to March model has four significant variables: elevation (44.2%), snow depth (29.6%), vegetation (18.1%) and CT350 (8.1%) (Table 5). The vegetation classes that were selected by caribou were mainly *Luzula*, lichens and herb barrens. The vegetation classes that were avoided were dwarf shrubs. From what can be seen in the graphical representation of the model (Fig. 7), the habitat quality of the Bathurst Island Complex is mostly low (red). The best quality habitats (in blue) are near the coasts and on the most northeastern point of the BIC (Cameron Island) where the elevation is low and snow depth is average (about 50 cm). The mean value of pixels in this model is  $0.134 \pm 0.218$ , which is substantially lower than the July to October season mean value ( $0.66 \pm 0.24$ ). As seen on figure 7, habitat suitability is a lot lower for this season.



Peary caribou did not appear to respond to either disturbed areas or CT350 during the April to June season. In fact, the univariate models explain little more about Peary caribou space use than what would be expected by random chance (i.e. AUC = 0.5). Instead, Peary caribou habitat use is best explained by vegetation (63.9 %), elevation (20.6 %) and snow depth (15.5 %) (Table 4 and 5). It seems logical that the vegetation would become a main driver of choice in habitat selection, since at the end of the winter, the individuals must eat high-energy vegetation to begin to accumulate fat reserves for the next year. The vegetation classes that were selected by the individuals are *Luzula*, purple saxifrage, lake and wetlands. They avoided unvegetated areas and herb barrens. The selected habitats are of low elevation, and high snow depths. At this latitude, there is still snow on the ground at this time of the year, so this habitat choice could be for similar reasons as in the November to March season. The mean value of all pixels for this model is  $0.408 \pm 0.223$ .

## 5. Discussion

The first objective of this study, which was to characterize snow conditions over BIC using the Antarctic version of the SNOWPACK model developed to better simulate polar snow conditions, was reached. The Antarctic version did improve snow modeling in the Arctic compared to the original SNOWPACK. Top layer density values were improved by 38.4% and the bottom layer density values were improved by 14.2% (Fig.5). The Ouellet et al. (2017) SNOWPACK spatialization tool allowed us to generate a 1-km grid of snow conditions over the entire BIC for the 2004-2005 year. The delimitations of large 32-kilometer squares are visible on the map of the July to October habitat model results (Fig. 7). This is due to the snow modeling, forced mainly by the NARR model which has a 32-km resolution. In the July to October habitat model, snow has a large percentage of contribution to the model (Table 5). Indeed, snow depth (41.3%) and snow density (measured by CT350) (23.8%) have a combined effect of 65.3%, causing the 32-km grid to be visible on the final model. Improvements in the resolution of meteorological forcing in the future may result in better predictions of Peary caribou habitat use in the Arctic, as it is lacking heterogeneity inside some 32-km NARR pixels. When topography and albedo are similar in a 32-km NARR pixel, very little variability is added. Our first hypothesis, which was that snow modeling at a 1-km resolution using elevation and vegetation improves the variability of the simulations within the same atmospheric forcing pixel, was partially achieved. Future work will focus on using GEM-LAM forecasts (2.5-km resolution) to force the SNOWPACK model and will investigate the potential of snow conditions simulated at 2.5 km (1 for 1; no downscaling) within MaxEnt. This would enable the use of the MaxEnt model across the whole Arctic Archipelago. This was not conducted in this study since GEM-LAM data are only available from 2017 onward, and GPS collar data are only available for the 2003 to 2005 period.

The second objective, testing the importance of snow in predicting Peary caribou space use compared to other environmental variables using MaxEnt simulations, was also reached. At least one snow variable was significant in every season, including summer where snow melts. This confirms our second hypothesis: snow simulations adapted to the Arctic region in the MaxEnt model are a significant predictor in Peary caribou habitat modeling throughout the year.

The snow depth variable was significant in every season. In the July to October season, when there isn't much snow, its 41.3% contribution (Table 5) could show that Peary caribou avoid snow-covered areas to maximize vegetation access to make fat reserves as quickly as possible. In the November to March season, where snow depth has a 29.6% contribution to the model (Table 5), the individuals used average snow depth areas (about 50 cm). This could hypothetically be linked to the trapping effect from vegetation, which increases snow depth but reduces snow density (Busseau et al., 2017). This situation was observed for the study site in Cambridge Bay when snow depths were compared to an ecological map (Ponomarenko et al., 2019) where the relationship between snow depth and ecotype was obvious (not published, subject of ongoing research). Caribou are generally able to dig through low-density snowpacks of less than 0.5 meters (Thomas and Edmonds, 1983), so these conditions concur with the literature on their behavior. More analyses must be made to confirm this. In the April to June season, individuals seem to avoid high snow depths (15.5% contribution: Table 5), which could be linked to the fact that they follow flowers blooming where snow has melted.

The CT350 variable was significant in the July to October and in the November to March model (respectively 23.8% and 8.1% contribution: Table 5). In both these models, Peary caribou individuals avoided high snow density areas. Several studies have shown that individuals avoid

areas where snow has a density above  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  because it impedes foraging (Vikhamar-Schuler et al., 2013; Johnson et al., 2016; Ouellet et al., 2017) and correlates with our findings.

The elevation variable was significant the three models, with contribution percentages ranging from 20.6% (April to June) to 44.2% (November to March) (Table 5). Peary caribou individuals avoided high elevations throughout the year. In the November to March model, the center of Bathurst Island is completely avoided by the individuals (possibility of presence of 0). This area has a high elevation (up to 400 meters) compared to the coast at near-sea level. Individuals could avoid this area since it does not offer shelter against high winter winds, although many studies have found that Peary caribou use exposed and windblown upland areas (Miller et al., 1977; Thomas et al., 1999). Since elevation and vegetation data were not correlated, we can safely assume that the reason individuals have avoided this area is not related to vegetation, or lack thereof. More analyses have to be made in order to confirm this hypothesis.

Vegetation was not a significant variable in the July to October model, but caribou tend to follow the spatial phenology of flowers blooming (Miller and Gunn, 2003), a seasonal vegetation condition that is not included in our predictors. The individuals seem to be selecting habitats by availability of vegetation over specificity, which is logical considering that greening at higher elevations during the summer opens more areas for grazing. Vegetation was significant in the November to March model, with a contribution to the model of 18.1% (Table 5). The individuals in this study selected areas with a dominance of rushes (*Luzula*), lichens and herb barrens, which corroborates nicely with literature (Parker et al., 1975; Thomas et al., 1976). They avoided areas with a dominance of dwarf shrubs. It could be explained by the fact that vegetation like shrubs traps snow and increases snow depth (Busseau et al. 2017; Sturm et al., 2001a). In this model, individuals used low to average snow depths. In the April to June model, Peary caribou habitat is

predominantly selected by types of vegetation (63.9% contribution: Table 5). The individuals selected habitats where rushes (*Luzula*) and purple saxifrage are dominant. These species are good examples of high-energy content in vegetation that Miller et al. (1977) and Gunn and Fournier (2000) found Peary caribou selecting during the calving season. They also selected lakes and wetlands, and they avoided unvegetated areas and herb barrens. Again, caribou need a lot of high-energy vegetation when they come out of the winter season drained of their fat reserves, which they must quickly regain before calving (Thomas, 1982).

One should note that the environmental variable of human disturbance was never significant in any model. This does not mean that Peary caribou are unaffected by humans, on the contrary, this has been shown many times in the past for the Rangifer species (Johnson and Russell, 2014; Nelleman and Cameron, 2010; Festa-Bianchet et al., 2011; Plante et al., 2018). With the data available in this study, it could be argued that the individuals of the BIC Peary caribou subpopulation do not seem to avoid abandoned oil exploration wells.

The GPS collars were programmed to collect one location every two days during the months of April through June, and one location every five days for the rest of the year. Variation in the frequency of locations acquisition does not affect our analyses because we separated the year into three seasons that correspond with the sample periods (three different and independent models). The increased sample size could have created a bias, but the results did not show an increased performance for this season.

The three models appear to be consistent with the available literature on Peary caribou, which is a major step forward in terms of habitat modeling for this species. More validations are in progress, particularly regarding the vegetation data used. The vegetation data may not be representative of

the actual vegetation since they were collected more than 20 years ago and no other vegetation data of this quality on BIC is available as of today. Climate change is affecting the vegetation quickly, especially by a widespread increase in shrub abundance and a shift in vegetation communities towards the north (Sturm et al., 2001b; Fauchald et al., 2017; Pearson et al., 2013). Running these models with updated vegetation data could improve the modeling results. Moreover, the seasons were derived for the entire Arctic Archipelago (Johnson et al., 2016) and may not capture regional differences in environmental conditions, which also change by longitude. Model performance may be improved in future by adjusting the seasons to better reflect specific environmental variability on BIC.

## 6. Conclusions

We conducted the first spatialized snow simulations at 1-km resolution over the Bathurst Island Complex, which allowed us to produce improved habitat models in MaxEnt, building on the work of Johnson et al. (2016). Our three models all had significant environmental snow variables, which allows us to corroborate the findings of Vikhamar-Schuler et al. (2014), Ouellet et al. (2017), Langlois et al. (2017) and Dolant et al. (2018) that caribou, and in this case the Bathurst Island Complex population of Peary Caribou, are in fact dependant on snow conditions throughout the year.

Our study was limited to this region and will be updated with both improved meteorological resolution using GEM-LAM data and a larger territory. The SNOWPACK model is also limited by its primary use. An Arctic version of this physical snow model is under development and could be implemented in the future. This new version should include a vapor flux between the soil and snow to improve snow microstructure developed under temperature gradient metamorphism, which would pave the way to microwave coupling and snow state variable assimilation. Vegetation data used in this study is also limited to the BIC region, which could be another limitation to extrapolate our models to the entire CAA.

The next steps in this line of work are to include rain-on-snow events and ice layer detection from passive microwaves (Langlois et al. 2017; Dolant et al., 2018; Dolant et al., 2016) and to implement GEM-LAM meteorological data at 2.5-km in place of 32-km NARR. These updates will allow for additional parameters to be tested within the MaxEnt modeling framework. We hope that these new models and data will contribute the broader science base for recovery planning for the Peary caribou.

**Acknowledgements**

The work in this paper was funded through Environment and Climate Change Canada, POLAR Knowledge Canada, Fonds de recherche du Québec – Nature et Technologie (FRQNT) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). We are extremely grateful to Morgan Anderson from the Government of Nunavut who encouraged the work and provided use with the GPS data used in this paper. The authors would like to thank Félix Ouellet and Jean-Benoit Madore for tremendous support working with the simulations. Special thanks to the administrative staff of the Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA) in Lyon, France for making a 2-month internship possible for the first author and to the Centre d'Études Nordiques for scholarships throughout the research.



## References

- Ahmed, S. E., McNerny, G., O'Hara, K., Harper, R., Salido, L., Emmott, S., & Joppa, L. N. (2015). Scientists and software - surveying the species distribution modeling community. *Diversity and Distributions*, 21(3), 258–267.
- Anderson, D. R., Burnham, K. P., & Thompson, W. L. (2000). Null hypothesis testing: Problems, prevalence, and an alternative. *Journal of Wildlife Management*, 64(4), 912–923.
- Barnett, T. P., J. C. Adam, & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impact of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 438, 303–309.
- Beaudoin-Galaise, M. (2016). Amélioration de la résolution spatiale de simulations de neige du modèle SNOWPACK dans un contexte de l'accès à la nourriture du caribou de Peary. Université de Sherbrooke, essay.
- Brazel, K. (2006). Geo-referencing and digitizing seven (7) GSC vegetation communities maps of the central Queen Elizabeth Islands, NU and NWT. Iqaluit, Nunavut.
- Busseau, B. C., Royer, A., Roy, A., Langlois, A., & Domine, F. (2017). Analysis of snow-vegetation interactions in the low Arctic-Subarctic transition zone (northeastern Canada). *Physical Geography*, 38(2), 159-175.
- Canadian Wildlife Service (2013). Summary of Discussions at the 2013 Meeting of the Peary Caribou Recovery Strategy Development Group - October 22-24, 2013. Canadian Wildlife Service unpublished report, Yellowknife, NT.
- COSEWIC (2004). COSEWIC assessment and update status report on the Peary caribou *Rangifer tarandus pearyi* and the barren-ground caribou *Rangifer tarandus groenlandicus* (Dolphin and

Union population) in Canada. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada (COSEWIC), Ottawa, Ont.

COSEWIC (2011). Designatable Units for Caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. Ottawa. 88 pp.

COSEWIC (2015). COSEWIC assessment and status report on the Peary Caribou *Rangifer tarandus pearyi* in Canada. Ottawa, Canada, 92 pages.

Davy, R., Chen, L., & Hanna, E. (2018). Arctic amplification metrics. *International Journal of Climatology*, 38(12), 4384-4394.

Day, J. J., Holland, M. M., & Hodges, K. I. (2018). Seasonal differences in the response of Arctic cyclones to climate change in CESM1. *Climate Dynamics*, 50(9-10), 3885-3903.

Derksen, C., & Brown, R. (2012). Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letters*, 39(19).

Derksen, C., R. Brown, L. Mudryk, & Luoju, K. (2016) 2016 Terrestrial Snow Cover [in Arctic Report Card 2016], <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.

Dolant, C., Langlois, A., Brucker, L., Royer, A., Roy, A., & Montpetit, B. (2017). Meteorological inventory of rain-on-snow events and detection assessment in the Canadian Arctic Archipelago using passive microwave radiometry. In *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 315-318).

Dolant, C., Langlois, A., Montpetit, B., Brucker, L., Roy, A. & Royer, A., (2016). Development of a rain-on-snow detection algorithm using passive microwave radiometry. *Hydrol. Process.* (13 pp.)

Dolant, C., Montpetit, B., Langlois, A., Brucker, L., Zolina, O., Johnson, C. A., Royer, A. & Smith, P. (2018). Assessment of the Barren Ground Caribou Die-off During Winter 2015 – 2016 Using Passive Microwave Observations. *Geophysical Research Letters*, 45(10), 4908–4916.

Domine, F., Gauthier, G., Vionnet, V., Fauteux, D., Dumont, M., & Barrere, M. (2018). Snow physical properties may be a significant determinant of lemming population dynamics in the high Arctic. *Arctic Science*, 4(4), 813-826.

Domine, F., Picard, G., Morin, S., Barrere, M., Madore, J.-B. & Langlois, A. (2019). Major Issues in Simulating some Arctic Snowpack Properties Using Current Detailed Snow Physics Models. Consequences for the Thermal Regime and Water Budget of Permafrost. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 34-44, doi: 10.1029/2018MS001445.

Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(January), 129–151.

Environment and Climate Change Canada (2019). climat.meteo.gc.ca [accessed in March 2020]

Fauchald, P., Park, T., Tømmervik, H., Myneni, R., & Hausner, V. H. (2017). Arctic greening from warming promotes declines in caribou populations. *Science Advances*, (26), 3:e1601365.

Festa-Bianchet, M., Ray, J. C., Boutin, S., Côté, S. D., & Gunn, A. (2011). Conservation of caribou (*Rangifer tarandus*) in Canada: an uncertain future. *Canadian journal of zoology*, 89(5), 419-434.

Fountain, A. G., Campbell, J. L., Schuur, E. A., Stammerjohn, S. E., Williams, M. W., & Ducklow, H. W. (2012). The disappearing cryosphere: impacts and ecosystem responses to rapid cryosphere loss. *BioScience*, 62(4), 405-415.

Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J. G., Wouters, B., Arendt, A. A., Wahr, J., ... & Ligtenberg, S. R. (2013). A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *science*, 340(6134), 852-857.

Gaston, K. J. (2009). Geographic range limits: achieving synthesis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1661), 1395-1406.

Gould, W. A., Raynolds, M., & Walker, D. A. (2003). Vegetation, plant biomass, and net primary productivity patterns in the Canadian Arctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D2).

Gouttevin, I., Langer, M., Löwe, H., Boike, J., Proksch, M., & Schneebeli, M. (2018). Observation and modeling of snow at a polygonal tundra permafrost site: spatial variability and thermal implications. *Cryosphere*, 12(11).

Grenfell, T. C. & Putkonen, J. (2008). A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, using passive microwave remote sensing. *Water Resources Research*, 44, W03425.

Groot Zwaaftink, C. D., Cagnati, A., Crepaz, A., Fierz, C., MacElloni, G., Valt, M., & Lehning, M. (2013). Event-driven deposition of snow on the Antarctic Plateau: Analyzing field measurements with SNOWPACK. *Cryosphere*, 7(1), 333–347.

Gunn, A., & Fournier, B. (2000). Identification and substantiation of caribou calving grounds on the NWT mainland and islands. File Report No. 123. Government of the Northwest Territories. Yellowknife, NWT. 177pp.

Hansen, B. B., Pedersen, A. O., Peeters, B., Le Moullec, M., Albon, S. D., Herfindal, I., Saether, B.-E., Grotan, V. & Aanes, R. (2019). Spatial heterogeneity in climate change effects decouples the long-term dynamics of wild reindeer populations in the high Arctic. *Global Change Biology*, 1-13.

Jenkins, D., & Lecomte, N. (2012). All about ice: Peary caribou movements in the Bathurst Islands complex. Department of Environment, Government of Nunavut, unpublished report, Pond Inlet, Nunavut. 22pp.

Johnson, C. J., & Russell, D. E. (2014). Long-term distribution responses of a migratory caribou herd to human disturbance. *Biological Conservation*, 177, 52-63.

Johnson, C. A., Neave, E., Blukacz-Richards, E. A., Banks, S. N., & Quesnelle, P. E. (2016). Knowledge assesment (community and scientific) to inform the identification of critical habitat for Peary caribou, *Rangifer tarandus pearyi*, in the Canadian Arctic. Ottawa, Canada.

Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In *Ijcai* (Vol. 14, No. 2, pp. 1137-1145).

Langlois, A., Johnson, C. A., Montpetit, B., Royer, A., Blukacz-Richards, E. A., Neave, E., Dolant, C., Roy, A.... Brucker, L. (2017). Detection of rain-on-snow (ROS) events and ice layer formation using passive microwave radiometry: A context for Peary caribou habitat in the Canadian Arctic. *Remote Sensing of Environment*, 189(February 2017), 84–95.

Langlois, A., Royer, A., Derksen, C., Montpetit, B., Dupont, F., & Goita, K. (2012). Coupling the snow thermodynamic model SNOWPACK with the microwave emission model of layered snowpacks for subarctic and arctic snow water equivalent retrievals. *Water Resources Research*, 48(12), 1–14.

Langlois, A., Royer, A., Montpetit, B., Roy, A., & Durocher, M. (2019). Presenting snow grain size and shape distributions in northern Canada using a new photographic device allowing 2D and 3D representation of snow grains. *Frontiers in Earth Science*, 7, 347.

Larter, N.C., & Nagy, J.A. (2001). Variation between snow conditions at Peary caribou and muskox feeding sites and elsewhere in foraging habitats on Banks Island in the Canadian High Arctic. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 33: 123-130.

Larter, N. C., Nagy, J. A., & Hik, D. S. (2002). Does seasonal variation in forage quality influence the potential for resource competition between muskoxen and Peary caribou on Banks Island? *Rangifer*, 22(2), 143–153.

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., & Satyawali, P. (2002a). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure. *Cold regions science and technology*, 35(3), 147-167.

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., & Fierz, C. (2002b). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3), 169-184.

Liston, G. E., & Hiemstra, C. A. (2011). The changing cryosphere: Pan-Arctic snow trends (1979-2009). *Journal of Climate*, 24(21), 5691–5712.

Lund, M., Stiegler, C., Abermann, J., Citterio, M., Hansen, B. U., & van As, D. (2017). Spatiotemporal variability in surface energy balance across tundra, snow and ice in Greenland. *Ambio*, 46(1), 81-93.

Miller, F.L. (1995). Peary caribou conservation studies, Bathurst Island complex, Northwest Territories, July-Aug 1993. Canadian Wildlife Service Technical Report Series No. 230. Canadian Wildlife Service, Prairie and Northern Region, Environment Canada. Edmonton, Alberta.

Miller, F.L. (2002). Multi-island seasonal home range use by two Peary caribou, Canadian High Arctic Islands, Nunavut, 1993-94. *Arctic* 55: 133-142.

Miller, F.L., & Barry S.J. (2003). Single-island home range use by four female Peary caribou, Bathurst Island, Canadian High Arctic, 1993-94. *Rangifer* 14: 267-281.

Miller, F. L., & Gunn, A. (2003). Status, population fluctuations and ecological relationships of Peary caribou on the Queen Elizabeth Islands: implications for their survival. *Rangifer*, (Special Issue No. 14), 213–226.

Miller, F.L., Edmonds, E.J., & Gunn, A. (1982). Foraging behaviour of Peary caribou in response to springtime snow and ice conditions. Canadian Wildlife Service Occasional Paper No. 48. Environment Canada.

Miller, F. L., Russell, R. H., & Gunn, A. (1977). Interisland movements of Peary caribou (*Rangifer tarandus pearyi*) on Western Queen Elizabeth Islands, Arctic Canada. *Canadian Journal of Zoology*, 55(6), 1029-1037.

Natural Resources Canada, (2013). Canadian Digital Elevation Model, 1945-2011, Edition 1.1. Government of Canada, <https://open.canada.ca/data/en/dataset/7f245e4d-76c2-4caa-951a-45d1d2051333>.

Natural Resources Canada, (2019). BASIN Database, Government of Canada. Retrieved from <http://basin.gdr.nrcan.gc.ca>.

Nellemann, C., & Cameron, R. D. (1998). Cumulative impacts of an evolving oil-field complex on the distribution of calving caribou. *Canadian Journal of Zoology*, 76(8), 1425-1430.

Ouellet, F., Langlois, A., Blukacz-Richards, E. A., Johnson, C. A., Royer, A., Neave, E., & Larter, N. C. (2017). Spatialization of the SNOWPACK snow model for the Canadian Arctic to assess Peary caribou winter grazing conditions. *Physical Geography*, (32), 143-158.

Papasodoro, C., Berthier, É., Royer, A., Zdanowicz, C., & Langlois, A. (2015). Area, elevation and mass changes of the two southernmost ice caps of the Canadian Arctic Archipelago between 1952 and 2014. *The Cryosphere*, 9, 1535-1550.

Parker, G.R., & Ross, R.K. (1976). Summer habitat use by muskoxen (*Ovibos moschatus*) and Peary caribou (*Rangifer tarandus pearyi*) in the Canadian High Arctic. *Polarforschung* 46: 12-25.

Parker, G.R., Thomas, D.C., Broughton, E., and D.R. Gray (1975). Crashes of muskox and Peary caribou populations in 1973-74 on the Parry Islands, Arctic Canada. Canadian Wildlife Service Occasional Paper, No. 35.



Pearson, R. G., Phillips, S. J., Loranty, M. M., Beck, P. S., Damoulas, T., Knight, S. J., & Goetz, S. J. (2013). Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature Climate Change*, 3(7), 673.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887-893.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modeling*, 190(3-4), 231-259.

Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distribution with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(December 2007), 161–175.

Pithan, F., & Mauritsen, T. (2014). Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience*, 7(3), 181.

Plante, S., Dussault, C., Richard, J. H., & Côté, S. D. (2018). Human disturbance effects and cumulative habitat loss in endangered migratory caribou. *Biological conservation*, 224, 129-143.

Ponomarenko, S., McLennan, D., Pouliot, D., & Wagner, J. (2019). High Resolution Mapping of Tundra Ecosystems on Victoria Island, Nunavut—Application of a Standardized Terrestrial Ecosystem Classification. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 45(5), 551-571.

Putkonen, J., & Roe, G. (2003). Rain-on-snow events impact soil temperatures and affect ungulate survival. *Geophysical Research Letters*, 30(4), 1–4.  
<https://doi.org/10.1029/2002GL016326>

Riche, F., & Schneebeli, M. (2013). Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations. *The Cryosphere*, 7(1), 217-227.

Romanovsky, V. E., Smith, S. L., & Christiansen, H. H. (2010). Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis. *Permafrost and Periglacial processes*, 21(2), 106-116.

Serreze, M. C., & Barry, R. G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, 77(1-2), 85-96.

Serreze, M. C., & Stroeve, J. (2015). Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2045), 20140159.

Stien, A., Loel, L. E., Mysterud, A., Severinsen, T., Kohler, J., & Langvatn, R. (2010). Icing events trigger range displacement in a high-arctic ungulate. *Ecology*, 91(3), 915–920.

Stroeve, J. C., Markus, T., Boisvert, L., Miller, J., & Barrett, A. (2014). Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophysical Research Letters*, 41(4), 1216-1225.

Sturm, M., J. P. McFadden, G. E. Liston, F. S. Chapin, C. H. Racine, and J. Holmgren (2001a), Snow-shrub interactions in Arctic tundra: A hypothesis with climatic implications, *J. Clim.*, 14, 336–344.

Sturm, M., Racine, C., & Tape, K. (2001b). Climate change: increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411(6837), 546.

Taylor, A.D.M. (2005) Inuit Qaujimagatuqangit about population changes and ecology of Peary caribou and muskoxen on the high arctic islands of Nunavut. Master's Thesis. Queen's University, Kingston, Ontario.

Thomas, D.C. (1982). The relationship between fertility and fat reserves of Peary caribou. *Canadian Journal of Zoology* 60: 597-602.

Thomas, D. C., & Edmonds, J. (1983). Rumen contents and habitat selection of Peary caribou in winter, Canadian Arctic Archipelago. *Arctic and Alpine Research*, 15(1), 97-105.

Thomas, D. C., Edmonds, E. J., & Armbruster, H. J. (1999). Range types and their relative use by Peary caribou and muskoxen on Melville Island, NWT. Environment Canada, Canadian Wildlife Service.

Thomas, D.C., Russell, R.H., Broughton, E., & Madore, P.L. (1976). Investigations of Peary caribou populations on Canadian arctic islands March-April 1975. Canadian Wildlife Service Progress Note No. 64, Environment Canada.

Vargel, C., Royer, A., St-Jean-Rondeau, O., Picard, G., Roy, A., Sasseville, V., & Langlois, A. (2020). Arctic and subarctic snow microstructure analysis for microwave brightness temperature simulations. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111754.

Vikhamar-Schuler, D., Hanssen-Bauer, I., Schuler, T. V., Mathiesen, S. D., & Lehning, M. (2013). Use of a multilayer snow model to assess grazing conditions for reindeer. *Annals of Glaciology*, 54(62), 214–226.

Walker, D. A. (2000). Hierarchical subdivision of Arctic tundra based on vegetation response to climate, parent material and topography. *Global Change Biology*, 6(Suppl. 1), 19–34.

### Supplementary material

**Table 6:** Correlation coefficients between variables used in MaxEnt modeling. The variables in italics were not kept in the chosen models.

<b>July to October</b>	1	2	3	4	5
1. Elevation	1,00				
2. <i>Vegetation</i>	0,07	1,00			
3. Snow depth	-0,12	0,01	1,00		
4. Snow density	-0,16	-0,10	0,38	1,00	
5. <i>Disturbance</i>	-0,02	0,01	0,01	0,02	1,00
<b>November to March</b>	1	2	3	4	5
1. Elevation	1,00				
2. Vegetation	0,07	1,00			
3. Snow depth	-0,31	0,04	1,00		
4. Snow density	-0,13	-0,10	0,41	1,00	
5. <i>Disturbance</i>	-0,02	0,01	0,05	0,02	1,00
<b>April to June</b>	1	2	3	4	5
1. Elevation	1,00				
2. Vegetation	0,07	1,00			
3. Snow depth	-0,29	0,03	1,00		
4. <i>Snow density</i>	-0,17	-0,06	0,77	1,00	
5. <i>Disturbance</i>	-0,02	0,01	0,06	0,03	1,00

## 5. Conclusion

Les trois objectifs du projet de recherche ont été atteints. Tout d'abord, l'Outil de Spatialisation de SNOWPACK en Arctique a été adapté à 1 kilomètre de résolution en intégrant des données spatiales sur l'albédo du sol, la pente et l'orientation de la pente. Ceci nous a permis de raffiner la modélisation de la neige avec des informations plus spécifiques sur l'environnement permettant un suivi des conditions de neige des diverses positions GPS enregistrées de colliers. Ensuite, en testant avec les données récoltées sur le terrain à Cambridge Bay, nous avons amélioré les simulations de neige créées par le modèle SNOWPACK. Pour ce faire, nous avons appliqué la version Antarctique de SNOWPACK (Groot Zaaftink *et al.*, 2013) à des conditions arctiques. Ceci a mené à une amélioration significative de l'épaisseur et de la densité de neige simulées par rapport aux données terrain. La simulation de la valeur de la densité de la couche de surface a été améliorée de 38.4% et la simulation de la valeur de la densité de la couche de surface a été améliorée de 14.2%. Finalement, nous avons créé des modèles de prédiction de l'habitat du caribou de Peary utilisant la modélisation de la neige de l'OSSA. Ces modèles ont permis de montrer que la végétation, l'élévation, la densité de la neige ainsi que l'épaisseur de la neige sont tous des facteurs contribuant au choix d'habitat du caribou de Peary.

L'article présenté à la section 3 s'est concentré sur les premiers modèles de prédiction de l'habitat du caribou de Peary. Il a également montré pour la première fois que la neige est une variable importante dans le choix d'habitat du caribou de Peary au cours des trois saisons biologiques. Plus particulièrement, les conclusions de l'article montrent que l'épaisseur de neige explique 41.3, 29.6 et 15.5% de la présence du caribou sur les modèles de juillet-octobre, novembre-mars et avril-juin respectivement. Il a aussi été démontré que l'épaisseur cumulée des couches de neige d'une densité supérieure à  $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  expliquent 23.8 et 8.1 % de la présence pour les modèles d'été et d'hiver validant ainsi l'hypothèse formulée que l'intégration d'information sur le couvert nival dans MaxEnt permet d'améliorer les prédictions de présence. De plus, la méthode peut s'adapter à différentes espèces puisque les variables considérées peuvent être changées en intrants à MaxEnt, tant au niveau des variables environnementales que nivales.

Les limites de ce modèle sont principalement les données de télémétrie utilisées comme intrants. Celles-ci sont spécifiques à sept femelles vivant exclusivement sur le Complexe d'Îles de Bathurst, ce qui limite la capacité du modèle à représenter d'autres régions. Le comportement

d'individus provenant d'autres populations de la même unité désignable pourrait être complètement différent en fonction de l'environnement qui est extrêmement variable dans la région du Haut-Arctique. Les modèles créés par le logiciel MaxEnt sont d'ailleurs reconnus pour être difficilement applicables à l'extérieur de la région pour laquelle ils ont été créés. Si l'on cherche à représenter l'habitat de l'unité désignable en entier avec cette méthodologie, il faudrait considérer que celle-ci est généralement séparée en 4 populations principales. Il serait donc difficile de créer moins d'un modèle par saison pour chacune de ces populations (douze modèles en tout). La meilleure option serait d'obtenir des données de télémétrie représentant des individus de chacune des populations, ce qui n'est actuellement pas disponible. Une alternative potentielle serait d'utiliser des données de compte d'individus, qui sont récoltées chaque année par Environnement Canada par des survols de régions en avion, une piste également poursuivie par le laboratoire actuellement. Ces données seraient toutefois moins complètes, puisqu'elles ne sont récoltées qu'à un seul moment dans l'année. Il serait difficile de représenter chacune des saisons biologiques du caribou de Peary avec uniquement ce type de données. Elles pourraient potentiellement être complétées avec les données des modèles développés dans le cadre de cette maîtrise.

Le modèle est également limité par la résolution grossière du forçage météorologique utilisé pour la modélisation de neige par SNOWPACK (NARR, 32 x 32 km). Il s'agissait des meilleures données disponibles pour la région du Complexe d'Îles de Bathurst au moment de débiter cette maîtrise. Le raffinement à une échelle d'un kilomètre utilisant l'albédo du sol et la pente demeure une bonne façon d'affiner la résolution spatiale des simulations, mais l'utilisation de données climatiques ayant une meilleure résolution, notamment celles du modèle Global Environmental Multiscale Limited-Area Model (GEM-LAM) (2,5 km de résolution) permettront certainement d'obtenir des résultats encore plus intéressants et pertinents. Des travaux subséquents sont d'ailleurs déjà en cours au laboratoire quant à l'intégration de ces données à l'OSSA en Arctique. L'automatisation de cet outil est également en cours dans le but d'exécuter les calculs et la modélisation sur un superordinateur, ce qui améliorera grandement l'efficacité des calculs.

La qualité de la modélisation de la neige est également réduite par le modèle lui-même, qui n'est pas adapté aux conditions arctiques. La version empirique que nous avons utilisée améliore certes les résultats, mais il ne s'agit pas d'une solution théorique. À ce sujet, l'OSSA intégrera bientôt

les modifications proposées par Gouttevin et al. (2018) améliorant significativement la densité du givre de profondeur en fixant une densité faible tant et aussi longtemps que l'épaisseur de neige ne dépasse pas la hauteur de végétation. Cependant, dans le cadre de notre projet nous sommes concentrés sur l'amélioration de la densité de surface puisqu'elle est beaucoup plus critique que la densité du givre de profondeur dans un contexte d'analyse des conditions de forage. De plus, des travaux actuels sur le métamorphisme au sein du SLF permettra d'inclure un flux de vapeur vertical provenant du sol qui mènera à une simulation de taille de grain et densité beaucoup plus représentative du givre de profondeur. Il est prévu dans notre laboratoire d'inclure cette version à l'OSSA dès que celle-ci sera disponible, avec un forçage de GEM-LAM à 2.5 km. Les résultats d'un modèle adapté à l'environnement étudié pourraient être plus pertinents et précis dans un modèle de prédiction d'habitat.

Les modèles développés dans le cadre de cette maîtrise permettent de mieux comprendre et analyser le grand territoire utilisé par le caribou de Peary. L'habitat utilisé par une espèce animale est extrêmement complexe, car il comprend tous les facteurs biotiques et abiotiques ayant une influence sur les individus, allant de la topographie aux espèces compétitrices. Nous espérons que notre inclusion d'information sur le couvert nival comme facteur limitant au choix d'habitat du caribou de Peary aidera les biologistes en charge de la conservation de l'espèce à mieux comprendre la dynamique des populations (événements de mort liés à une densité élevée de la neige) et le mouvement des populations (recherche de milieux où la neige est moins dense). La neige a rarement été utilisée comme facteur explicatif de la présence ou de l'absence d'espèces animales en écologie, notamment à cause de la difficulté technique d'obtenir des données précises sur celle-ci sur de grands territoires. Les conditions nivales sont de nature très variable et demandent l'utilisation d'instruments complexes combinées à des connaissances approfondies sur les processus thermodynamiques expliquant la variabilité spatio-temporelle de la neige. Cette méthode d'utilisation des résultats du modèle physique de neige SNOWPACK comme intrant à la modélisation de l'habitat par MaxEnt pourra certainement être appliquée à d'autres unités désignables du caribou, notamment le caribou de Barren Ground qui vit dans des conditions semblables, ainsi qu'à d'autres espèces qui mangent de la végétation encastrée sous la neige telles que le bœuf musqué, ou même des espèces qui utilisent le manteau neigeux comme habitat comme les lemmings. Il serait même possible d'étendre ce système à des espèces animales qui parcourent de grandes distances comme le loup.

De plus, les modèles de prédiction de l'habitat développés dans MaxEnt peuvent être utilisés pour prévoir la réponse à des changements environnementaux (Wintle *et al.* 2005). Pour ce faire, il faut soumettre les modèles créés à des simulations de futures conditions environnementales. Les résultats obtenus indiquent les endroits où les possibilités de présence de l'espèce sont élevées dans ces nouvelles conditions. Les simulations environnementales du GIEC/IPCC sont souvent utilisées pour de telles études. Dans le contexte actuel de changements climatiques, de nombreux facteurs environnementaux seront amenés à changer, dont l'incidence des événements de pluie-sur-neige qui sera très probablement à la hausse (Mallory et Boyce, 2017). Les études récentes sur la PSN et tempêtes hivernales montrent une influence certaine sur la survie des ongulés en général, ainsi que des incidents potentiels de mort massive (Grenfell and Putkonen, 2008; Langlois et al., 2017; Dolant et al., 2018). Il sera intéressant dans le futur de voir les études inclure la modélisation de la neige ainsi que des données d'occurrence de PSN comme parties intégrantes de l'habitat des ongulés, particulièrement chez le caribou de Peary. Des études subséquentes pourront certainement utiliser et améliorer nos modèles en implémentant des simulations de conditions environnementales et éventuellement en choisissant des zones à protéger spécifique au caribou de Peary.

La conservation des espèces animales a toujours pour premier objectif de protéger l'animal, et son habitat vital. Dans le cas du caribou de Peary, nous espérons fortement que les modèles développés dans ce mémoire permettront d'aider les experts à choisir les zones appropriées. Cependant, il faudra également limiter le développement minier et pétrolier, ou toutes autres activités industrielles qui peuvent amener un dérangement des individus dans les zones limitrophes à l'habitat du caribou. Il sera important de réduire les passages de bateaux pour s'assurer que les passages interinsulaires fréquents des caribous soient plus faciles. La diminution de l'épaisseur des glaces amène davantage de passages de bateaux en Arctique, par exemple dans le passage du Nord-Ouest. Il faudra également s'assurer que la gestion de la chasse reste saine, c'est-à-dire qu'elle permet à la population de caribou de se rétablir, tout en permettant aux Inuits de conserver leurs activités traditionnelles. La conservation du caribou de Peary dans un contexte de changements climatiques est un grand défi pour toutes les parties prenantes et il sera très intéressant de voir comment celle sera atteinte.



## 6. Bibliographie

*Les ouvrages cités dans l'article ne sont pas inclus dans cette bibliographie, mais plutôt dans celle de l'article. Les références de l'article sont aux pages 54 à 64 du mémoire.*

Bartelt, P., et Lehning, M. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3), pp. 123-145.

Brotons, L., Thuiller, W., Araújo, M. B., & Hirzel, A. H. (2004). Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography*, 27(4), 437–448.

Boulanger, J., Gunn, A., Adamczewski, J., & Croft, B. (2011). A data-driven demographic model to explore the decline of the Bathurst caribou herd. *The Journal of Wildlife Management*, 75(4), 883-896.

Chase, J. M., & Leibold, M. A. (2003). *Ecological niches: linking classical and contemporary approaches*. University of Chicago Press.

COSEPAC (2004). Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC caribou de Peary *Rangifer tarandus pearyi* et le caribou de la toundra *Rangifer tarandus groenlandicus* (population de Dolphin-et-Union) au Canada. Ottawa, Canada.

Derksen, C. et Brown, R. (2012). Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections, *Geophysical Research Letters*, 39(19), pp. 1–6.

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57.

Gouttevin, I., Lehning, M., Jonas, T., Gustafsson, D. et Mölder, M. (2015). A two-layer canopy model with thermal inertia for an improved snowpack energy balance below needleleaf forest (model SNOWPACK, version 3.2.1, revision 741), *Geoscientific Model Development*, 8(8), pp. 2379–2398.

Gunn, A. (2003). Voles, lemmings and caribou - population cycles revisited? *Rangifer*, 23(5), 105–112.

Gunn, A., Miller, F. L., Barry, S. J., & Buchan, A. (2006). A near-total decline in caribou on Prince of Wales, Somerset, and Russell islands, Canadian Arctic. *Arctic*, 59(1), 1–13.

Hijmans, R. J., & Elith, J. (2013). *Species distribution modeling with R*. R package version, updated 08-11.

Hirzel, A. H. H., Ausser, J. H., & Hessel, D. C. (2002). Ecological-Niche Factor Analysis: How To Compute Habitat-Suitability Maps Without Absence Data?, *Ecology*, 83(7), 2027–2036.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers*. IPCC, 31.

- Kaufman, D.S., Schneider, D.P., McKay, N.P., Ammann, C.M., Bradley, R.S., Briffa, K.R., Miller, G.H., Otto-Bliesner, B.L., Overpeck, J.T. et Vinther, B.M. (2009). Recent warming reverses long-term Arctic cooling, *Science*, 325 (5945), pp. 1236–1239.
- Langlois, A., Kohn, J., Royer, A., Cliche, P., Brucker, L., Picard, G., ... & Willemet, J. M. (2009). Simulation of snow water equivalent (SWE) using thermodynamic snow models in Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, 10(6), 1447-1463.
- Madore, J. B. (2016). Évaluation de la modélisation de la taille de grain de neige du modèle multi-couches thermodynamique SNOWPACK: implication dans l'évaluation des risques d'avalanches. Université de Sherbrooke.
- Mallory, C. D., & Boyce, M. S. (2017). Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer. *Environmental Reviews*, 26(1), 13-25.
- Mekis, É., & Vincent, L. A. (2011). An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49(2), 163–177.
- Meredith, M., M. Sommerkorn, S. Cassotta, C. Derksen, A. Ekaykin, A. Hollowed, G. Kofinas, A. Mackintosh, J. Melbourne-Thomas, M.M.C. Muelbert, G. Ottersen, H. Pritchard, and E.A.G. Schuur (2019). Polar Regions. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058–1069.
- Miller, F. L., & Barry, S. J. (2009). Long-Term Control of Peary Caribou Numbers by Unpredictable, Exceptionally Severe Snow or Ice Conditions in a Non-equilibrium Grazing System. *Arctic*, 62(2), 175–189.
- Ortega-Huerta, M. A., & Peterson, A. T. (2008). Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 79(1), 205–216.
- Phillips, S. J. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models : implications for background and pseudo-absence data Reference Sample selection bias and presence-only distribution models : implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 19(1), 181–197.
- Semmens, K. A., Ramage, J., Bartsch, A., & Liston, G. E. (2013). Early snowmelt events: detection, distribution, and significance in a major sub-arctic watershed. *Environmental Research Letters*, 8, 014020.
- Sharma, S., Couturier, S., & Côté, S. D. (2009). Impacts of climate change on the seasonal distribution of migratory caribou. *Global Change Biology*, 15(10), 2549–2562.

Tarkesh, M., & Jetschke, G. (2012). Comparison of six correlative models in predictive vegetation mapping on a local scale. *Environmental and Ecological Statistics*, 19(3), 437–457. <https://doi.org/10.1007/s10651-012-0194-3>

UNEP (2007). *Global Outlook for Ice & Snow*, United Nations Environment Program, Norvège, 235 p.

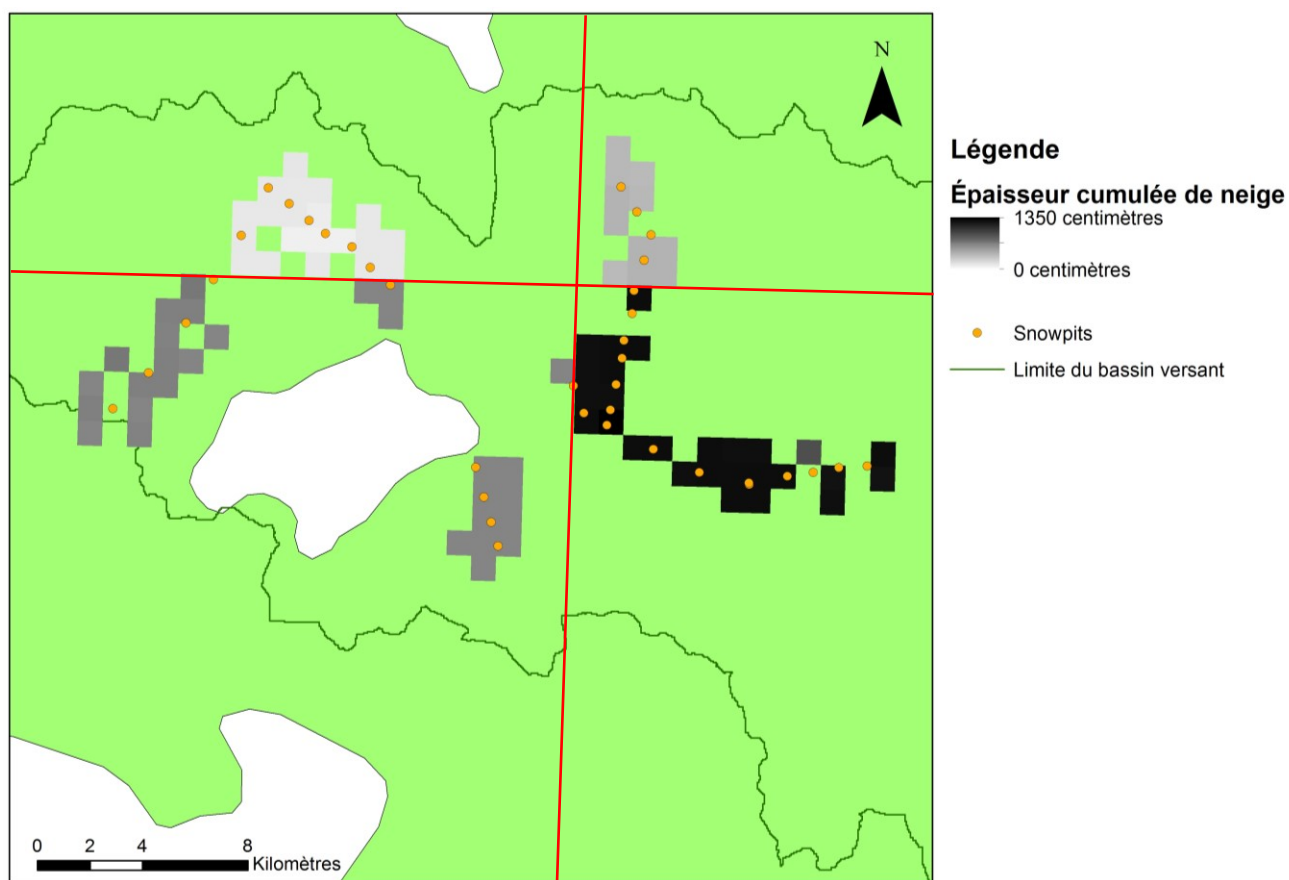
Vors, L. S., & Boyce, M. S. (2009). Global declines of caribou and reindeer. *Global Change Biology*, 15(11), 2626–2633.

Wintle, B. A., Elith, J., & Potts, J. M. (2005). Fauna habitat modelling and mapping: a review and case study in the Lower Hunter Central Coast region of NSW. *Austral Ecology*, 30(7), 719–738.

## Annexe 1 – Résultats complémentaires

### *Simulations de la version originale de SNOWPACK par l'OSSA*

La figure 5 montre un exemple de simulation avec la version originale de SNOWPACK par l'OSSA. Les lignes rouges sont les séparations la grille de pixels de forçage météorologique NARR à 32 kilomètres de résolution. On peut remarquer que les pixels représentant l'épaisseur cumulée de neige ont une couleur différente dans chaque grand pixel NARR, ce qui indique qu'il n'y a pas beaucoup de variabilité à l'intérieur d'un pixel NARR. Ceci est dû au fait que l'albédo (couverture du sol), qui oscille entre 0.16 et 0.20, et l'élévation, (quasi nulle dans la région) n'offrent pas beaucoup de variation, et permet de voir les différences entre les pixels NARR.



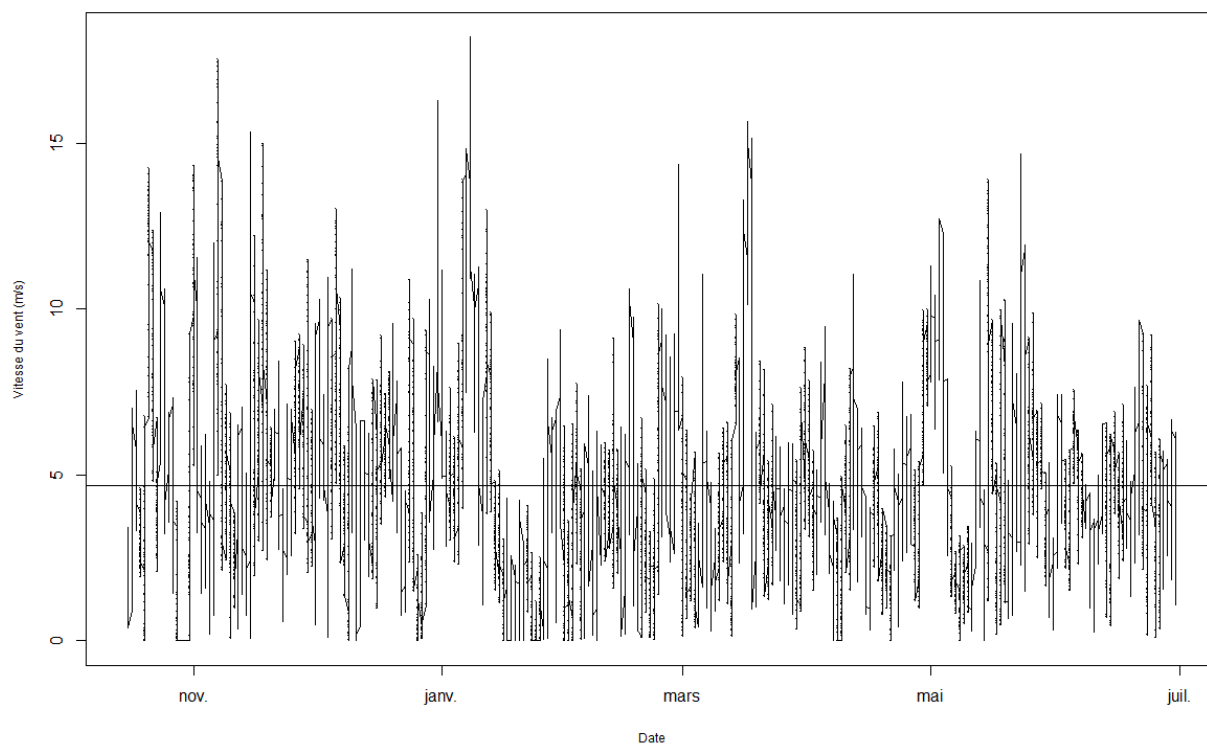
**Figure 5 : Épaisseur cumulée de neige lorsque la densité dépasse  $350 \text{ kg m}^{-3}$  sur le site du bassin versant de Greiner en 2016**

### *Application de la version Antarctique de SNOWPACK*

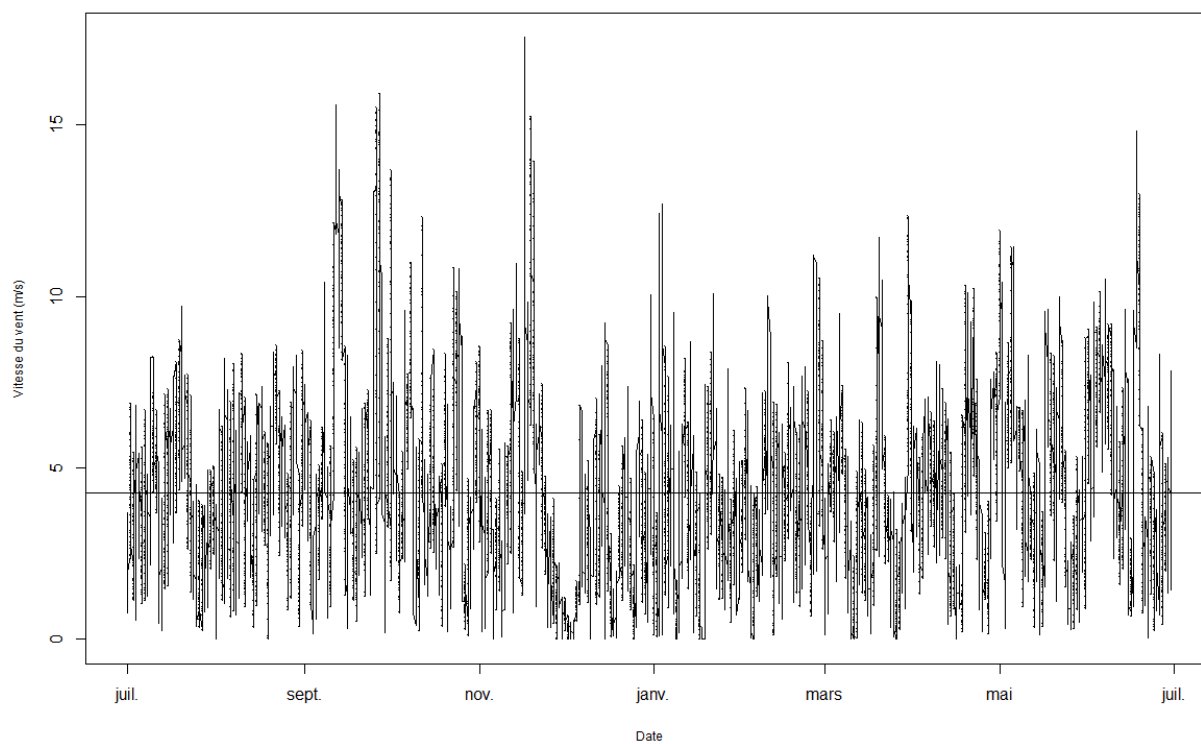
Avant de lancer les simulations avec la version Antarctique de SNOWPACK, il a tout d'abord fallu s'assurer que les vitesses de vent dépassaient bien la condition principale du modèle pour que tout fonctionne. Tel qu'expliqué précédemment, la version Antarctique de SNOWPACK n'ajoute de la neige que lorsque la moyenne de la vitesse du vent à une hauteur de 3 mètres est supérieure à 4 m/s sur 100 heures. Pour l'année 2015 (figure 6) la vitesse moyenne du vent est de  $4,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les moyennes rétroactives sur 100 heures sont supérieures à  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  environ 63,3% du temps. En 2016 (figure 7), la vitesse moyenne du vent est de  $4,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les moyennes rétroactives sur 100 heures sont supérieures à  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  environ 53,7 % du temps. Ces chiffres montrent que l'utilisation de la version Antarctique de SNOWPACK est justifiable.

L'application de la version Antarctique de SNOWPACK est simple, il suffit de changer des paramètres dans les fichiers de configuration de SNOWPACK. Cependant, l'OSSA n'a pas été créé pour l'utilisation de cette version, donc il n'est pas possible de l'utiliser pour faire plusieurs simulations au même moment. Les tests ont donc été faits sur un pixel. La simulation qui est présentée a été faite sur le pixel NARR 177\_210, et plus précisément sur le kilomètre carré dont le numéro est 25\_32 (25° vers l'est, 32° au sud), pour le nom complet de pixel 177\_210\_25\_32, comme il sera référé ci-après.

La modélisation par la version Antarctique de SNOWPACK a significativement amélioré la simulation de la densité des couches supérieures et inférieures du couvert nival, tel que décrit dans l'article présenté à la section 3 (figures 4 et 5 de l'article). Sur ces figures, on peut observer que la forme de la simulation par la version Antarctique (haut) semble beaucoup moins naturelle que la version originale (bas). Ceci est dû à la condition d'ajout de neige. Or, comme l'épaisseur représentée est toujours extrêmement proche de l'épaisseur réelle mesurée sur le terrain, la simulation peut être acceptée. Ensuite, pour ce qui est de la densité, sur le graphique du bas, on observe le renversement habituel des densités simulé par la version originale : densité forte au sol et faible en surface. Or, sur le graphique du haut, on peut voir que ces tendances ont été inversées, pour obtenir des résultats beaucoup plus près de la réalité sur le terrain. Les petits graphiques de densité en fonction de l'épaisseur à droite des précédents graphiques montrent davantage le détail de l'épaisseur simulée par chaque version de SNOWPACK, en date du 3 avril 2016 à 9h00, soit la date et l'heure à laquelle le snowpit a été fait sur le terrain.



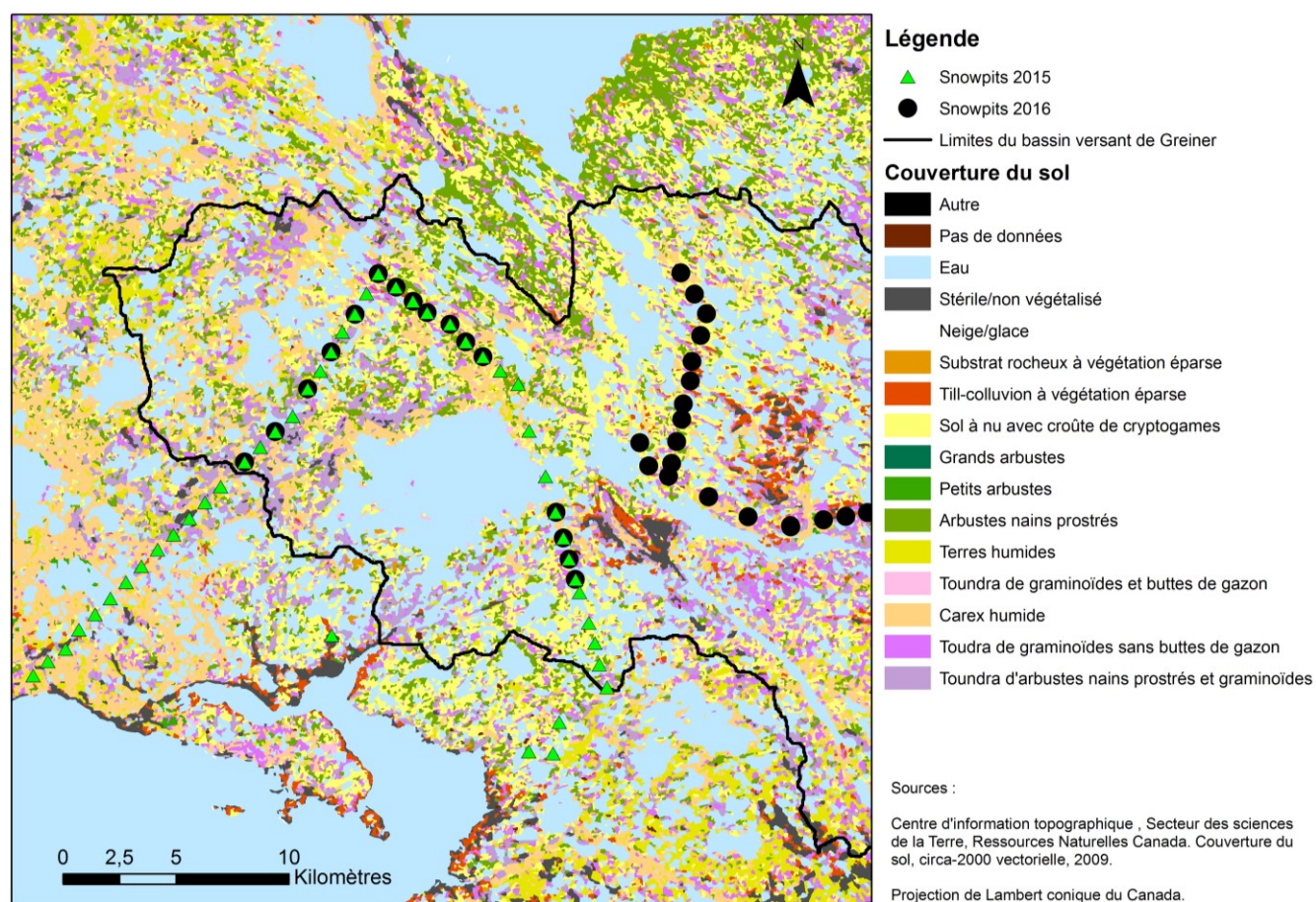
**Figure 6 : Vitesse du vent à la station météorologique de Cambridge Bay du 16 octobre 2014 au 30 juin 2015. La ligne droite est la vitesse moyenne annuelle :  $4,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$**



**Figure 7 : Vitesse du vent à la station météorologique de Cambridge Bay du 1 juillet 2015 au 30 juin 2016. La ligne droite est la vitesse moyenne annuelle :  $4,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$**

### *Densité de la couche basale en présence de végétation*

Pour améliorer la simulation de la densité de la couche basale de neige en présence de végétation avec les algorithmes développés par Gouttevin *et al.* (2015), une exploration de plusieurs jeux de données a été nécessaire. Tout d'abord, les données CIRCA-2000 vectorielles de la région de Cambridge Bay ont été cartographiées (figure 8). Sur cette carte, on peut observer que dans la région ouest du bassin versant de Greiner, là où les snowpits ont été creusés sur le terrain en 2015 et 2016, plusieurs types de couverture de sol sont présents. Il s'agit d'une région très humide, remplie de petites étendues d'eau. Dans l'ouest et le nord, il y a une majorité de carex humide, d'arbustes nains prostrés et de toundra de graminoides avec et sans buttes de gazon. À l'est de la carte, on remarque des zones stériles et de till-colluvion à végétation éparse. À titre informatif, les campagnes de terrain de d'avril 2017 et de mai 2018 ont répété tous ces points.



**Figure 8 : Couverture du sol dans la zone d'étude à l'ouest du bassin versant de Greiner, île de Victoria, Nunavut**

Les locations des snowpits ont été déterminées aléatoirement avant le début des campagnes de terrain en 2015. Avec des analyses spatiales, on a pu déterminer que la moitié des snowpits se trouvent en milieu non-végétalisé, et que l'autre moitié se trouve en milieu végétalisé. Nous avons vérifié la concordance entre le type de milieu se trouvant sous le snowpit selon les données de CIRCA-2000 et les pixels que nous avons créés à une échelle de 1 km<sup>2</sup>. Les pixels prennent le type de sol dominant dans la région représentée. Le tableau 2 montre une table de contingence du nombre de snowpits de l'année 2015 par couverture de sol, envers la couverture de sol des pixels de 1 km<sup>2</sup> qui leurs sont associés. L'association des pixels se fait par une analyse de distance, en choisissant le pixel englobant le snowpit s'il est disponible, ou le plus proche s'il est indisponible. Certains pixels de 1 km<sup>2</sup> sont indisponibles parce que leur couverture du sol est à plus de 50% d'eau, ce que l'OSSA rejette avant de lancer les simulations. Dans cette table de contingence, on remarque tout d'abord que seulement quatre couvertures de sol sont représentées dans les pixels, contre 9 dans la réalité. Ensuite, on peut remarquer que les catégories 37, 53, 102 et 104 sont assez mal représentées dans leur pixel associé, étant toutes moins de 80% dans un pixel représentatif.

Des analyses végétales sur le terrain (détermination de la végétation dominante, identification des individus à l'espèce et détermination de l'albédo dans des parcelles) pourraient possiblement avoir lieu afin de quantifier l'impact de cette approximation sur la modélisation du couvert nival, ainsi que de vérifier la qualité de la mesure de l'albédo qui est associée à chacune de ces catégories. L'idéal serait toutefois d'obtenir des données plus récentes sur le type de végétation, puisque les données de CIRCA-2000 commencent à être désuètes avec le changement de végétation en Arctique dû aux changements climatiques.

Pour l'analyse des données récoltées sur le terrain, la première analyse a été de déterminer s'il y avait des différences entre les densités pour les couches supérieure et inférieure en présence et absence de végétation pour l'année 2016 (figure 9). En 2016, il y avait une différence significative entre la densité de la couche inférieure en présence de végétation et en absence de végétation. Malgré le fait que les autres relations n'étaient pas significatives, ceci encourage tout de même l'utilisation des algorithmes de Gouttevin *et al.* (2015).

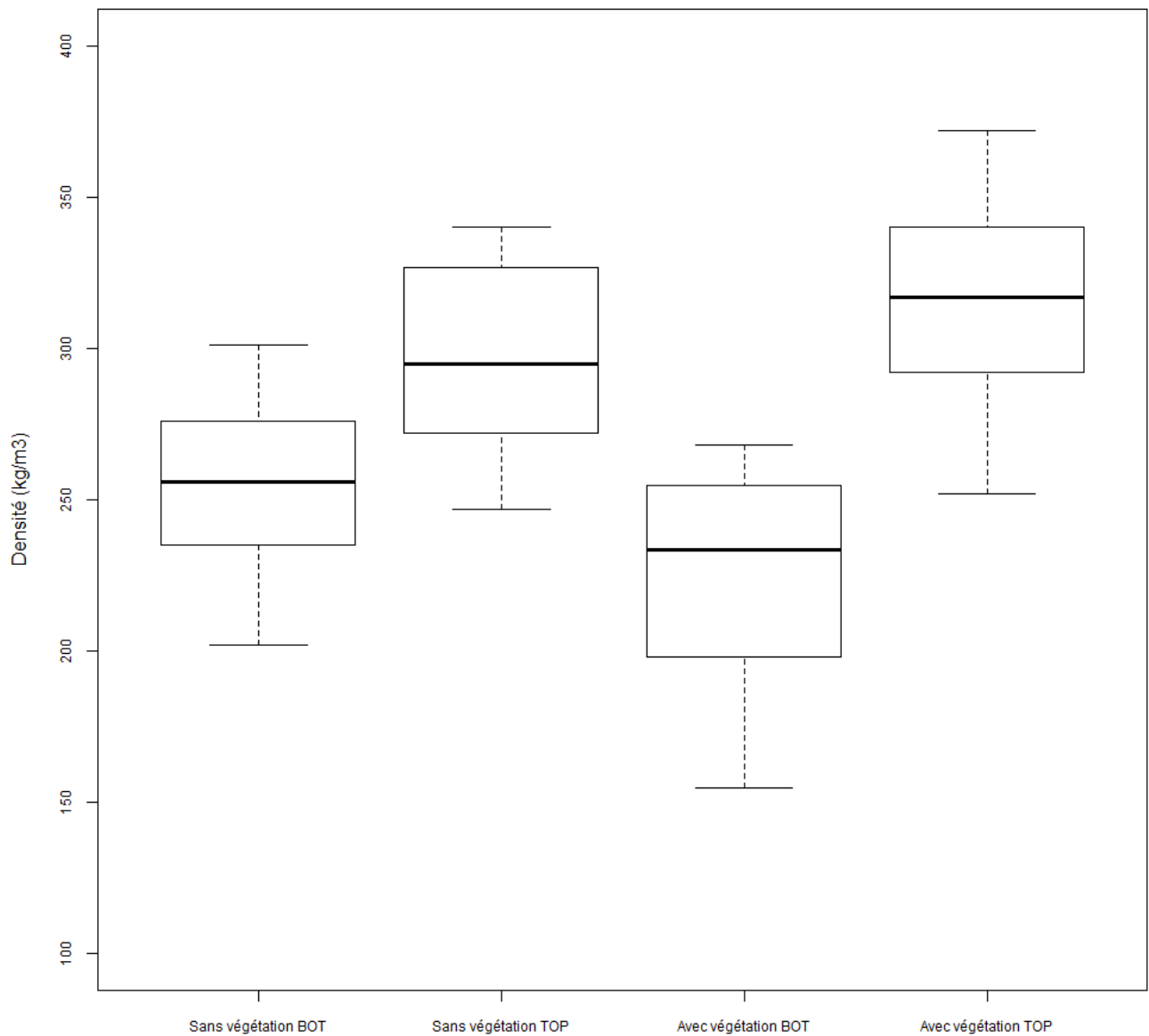


**Tableau 2 : Table de contingence entre la couverture du sol réelle sous les snowpits de l'année 2015 et les pixels associés. Les pourcentages de la dernière colonne montrent la proportion de snowpits qui sont représentés par un pixel de la même catégorie.**

		Pixels associés				Total de pixels	Pourcentage de pixels concordants
		37	53	102	104		
Snowpits de l'année 2015	20 - Eau	4	0	2	2	8	0%
	30 - Stérile / Non-végétalisé	0	0	0	2	2	0%
	36 - Till-colluvion à végétation éparse	1	0	0	0	1	0%
	37 - Sol à nu avec croûte de cryptogames	10	0	2	1	13	77%
	53 - Arbustes nains prostrés	2	1	0	0	3	33%
	80 - Terres humides	0	1	2	2	5	0%
	102 - Carex humide	2	1	7	0	10	70%
	103 - Toundra de graminoides et d'arbustes nains (milieu humide)	1	0	0	0	1	0%
	104 - Toundra d'arbustes nains prostrés et de graminoides (milieu sec)	0	0	3	2	5	40%
Total		20	3	16	9		

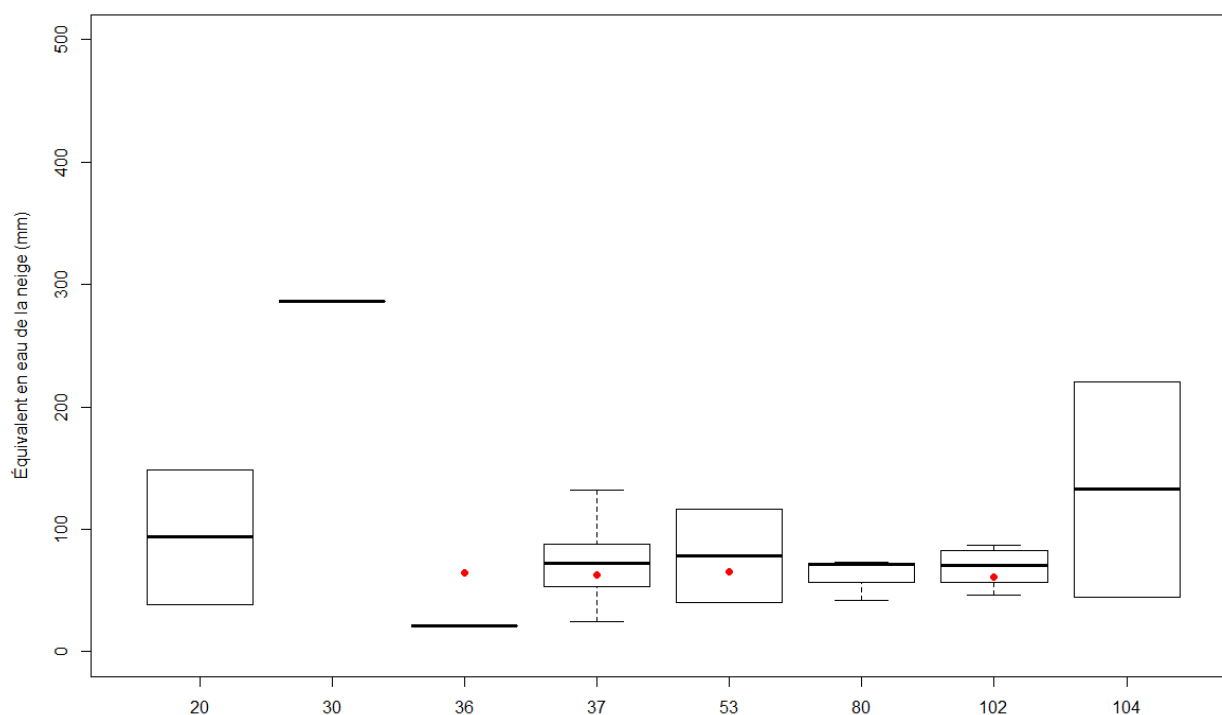
Ensuite, une analyse de l'épaisseur selon le type de végétation a été faite pour l'année 2016 (figure 10). Sur la figure 10, on peut observer qu'en 2016, la médiane de l'épaisseur de neige dans presque tous les types de végétation était entre 20 et 40 centimètres. On peut également observer que les simulations par la version originale de SNOWPACK (points rouges) surestiment toutes les médianes d'épaisseur de neige. Des résultats très semblables ont été observés en 2015 (épaisseur moyenne et surestimation par les simulations).

Le même genre d'analyse a été conduite pour l'équivalent en eau de la neige en fonction du type de végétation (figure 11). La figure 11 montre également les résultats de l'année 2016. La moyenne de l'équivalent en eau de la neige oscille en moyenne entre 50 et 100 millimètres. Toutefois, les simulations par la version originale de SNOWPACK sont beaucoup plus près de la réalité, n'ayant que quelques millimètres de différence avec la médiane. En 2015, les résultats étaient très semblables à la figure 11 (moyenne et simulations réalistes).

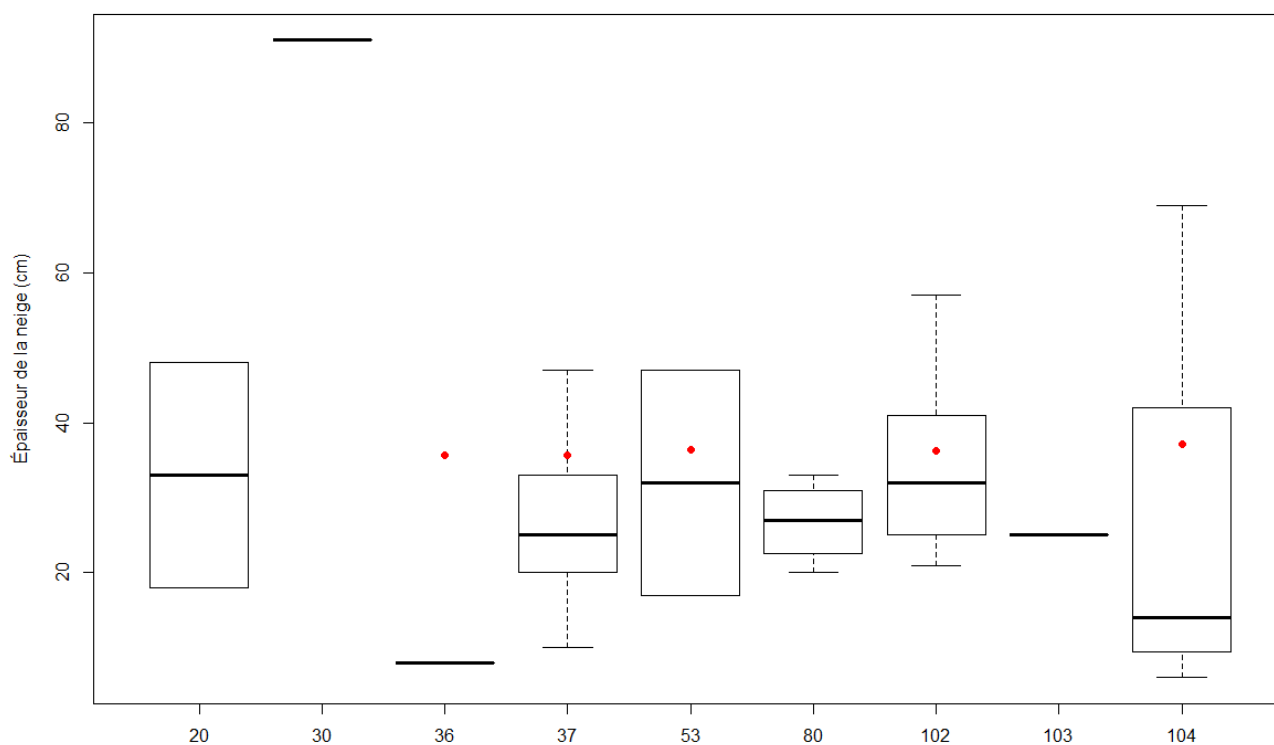


**Figure 9 : Densité des couches inférieure (BOT) et supérieure (TOP) des snowpits selon l'absence ou la présence de végétation en 2016**

L'application des travaux de Gouttevin et al. (2015) implique d'altérer le code source de SNOWPACK, afin de modifier la fonction de densification de la neige manuellement. Il s'agit donc d'une modification empirique qui demandera plusieurs types de validation avec les données récoltées sur le terrain. Il s'agit de la prochaine étape à suivre, en considérant que l'exploration des données présentée ici montrent une diversité de couverture de sol (végétalisé et non-végétalisé), ainsi qu'un problème manifeste de simulation de l'épaisseur du couvert nival, et probablement de la densité. Ceci a été appliqué dans l'article.



**Figure 10 : Épaisseur de la neige des snowpits de 2016 en fonction du type de végétation (codes numériques au tableau 2). Les points rouges sont les moyennes des simulations SNOWPACK pour le même type de végétation.**



**Figure 11 : Équivalent en eau de la neige (SWE) des snowpits de 2016 en fonction du type de végétation (codes numériques au tableau 2). Les points rouges sont les moyennes des simulations par SNOWPACK pour le même type de végétation.**

## **Annexe 2 – Liste des présentations et affiches**

**Martineau C.**, Langlois A., Johnson C.A., Gouttevin I. (2018). Modélisation de l’habitat du Caribou de Peary dans l’Archipel Arctique Canadien supportée par simulations SNOWPACK du couvert nival. *Présentation orale présentée au Colloque 2018 du Centre d’Études Nordiques*, Sherbrooke, Canada.

**Martineau C.**, Langlois A., Gouttevin I., Johnson C.A. (2017). Adaptation and validation of the SNOWPACK model to Arctic conditions. *Affiche présentée à l’Eastern Snow Conference 2017*, Ottawa, Canada.

**Martineau C.**, Langlois A., Johnson C.A., Gouttevin I. (2017). Apport des simulations du couvert nival du modèle SNOWPACK pour la prédiction d’habitat du caribou de Peary en Arctique. *Affiche présentée au Colloque 2017 du Centre d’Études Nordiques*, Québec, Canada.

**Martineau C.**, Langlois A., Johnson C.A., Gouttevin I. (2017). Apport des simulations du couvert nival du modèle SNOWPACK pour la prédiction d’habitat du caribou de Peary en Arctique. *Affiche et présentation orale présentées aux Journées Glaciologie - Nivologie - Eau en montagne 2017*, Grenoble, France.